

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Sistema reconfigurable de síntesis sonora a
través de módulos conectables**

Guillermo Cantalapiedra Pro

Junio 2017

Sistema reconfigurable de síntesis sonora a través de módulos conectables

AUTOR: Guillermo Cantalapiedra Pro

TUTOR: Ramón Ignacio Barber Castaño

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Carlos III de Madrid

Junio de 2017

Agradecimientos

A mis amigos y a mis padres, que sin su apoyo constante este trabajo no habría podido realizarse.

A Diego Fernández, que me introdujo en la síntesis y en la producción musical, su palabra y consejo han sido fundamentales en mi evolución profesional y personal.

A Irene Rodríguez, cuya valentía e iniciativa me inspiraron para presentar este proyecto como Trabajo de Fin de Grado.

A Gonzalo Badiola, su espíritu innovador y su esmero por el diseño permitieron que este instrumento obtuviera una forma. Junto a él, a todos los que forman Th3Dot, el espacio donde las ideas se hacen realidad.

A Jorge Gómez y a Rodolfo García a los que agradezco su carácter y su paciencia cada viernes por la tarde, desentrañando los misterios de la electrónica analógica.

A Ramón Ignacio Barber Castaño, tutor de este trabajo, gracias al cual he conseguido pulir mis ideas y alcanzar la posibilidad de transmitirlas de la mejor manera posible.

Y a la Universidad Carlos III de Madrid, por apoyar desde el principio este proyecto y por facilitarme la tarea de prototipado y de obtención de materiales.

Resumen

La síntesis sonora es el arte de obtener sonidos a partir de medios no acústicos, que pueden ser analógicos, debido a variaciones de voltaje en un circuito eléctrico; o digitales, calculados mediante algoritmos en un procesador. La síntesis investiga el sonido desde su raíz, capturando los distintivos matices que consiguen distinguirlo: su textura, brillo, duración, armonía, etc.

En los últimos años la generación del sonido ha evolucionado junto al crecimiento tecnológico, siendo la síntesis sonora, la manera más habitual y rápida de reflejar una idea, ya sea, por ejemplo, como instrumento en una canción o como complemento a los efectos especiales en una película.

La creación de dichos sonidos se fundamenta en dos bases: la modulación y la combinación de timbres. El sintetizador es el instrumento que consta de las herramientas necesarias para desempeñar las funciones anteriores, lleva en desarrollo desde comienzos del siglo XX, y su fundamento es puramente electrónico, lo que provoca que esté en continua transformación.

Con la aparición de nuevas tecnologías, los sintetizadores han podido disminuir su tamaño y aumentar sus posibilidades. La digitalización de los sintetizadores ha provisto de una potenciación de sus funcionalidades, simplificado su uso y abaratado sus costes, pero una gran parte del público sigue prefiriendo el contacto directo con el instrumento físico, lo que fortalece su aprendizaje y creatividad.

La complejidad de la síntesis sonora radica en el uso creativo de diversas herramientas o módulos que perfilan la señal de distintas maneras. La comunicación entre módulos, gracias a cables de distintas longitudes, provoca la evolución tímbrica de los sonidos, pero la programación de estos se vuelve compleja cuando se quieren alcanzar detalles muy concretos.

Los cables surcan el frontal del instrumento, dificultando la visión de los parámetros y de los controles. A su vez, seguir la ruta de las señales se convierte en una tarea difícil, convirtiendo a este instrumento en poco intuitivo y alejando al artista novel de este aparato.

Teniendo en cuenta lo expuesto, este proyecto se plantea como una solución a la necesidad de simplificar la interconexión de sistemas modulares, aportando claridad al flujo de la señal e implantando un nuevo entorno de programación de síntesis. El sistema se orientará hacia una conexión lateral de los módulos, evitando la necesidad de cables y dejando el frontal del instrumento libre de obstáculos. Esta solución también simplifica el seguimiento del flujo de la señal a lo largo del instrumento, ya que ahora los módulos quedan agrupados. La alimentación de los módulos se realiza también a través de las

conexiones laterales por lo que si un módulo no está siendo utilizado puede ser desconectado del sistema y reducir el consumo del mismo.

Este nuevo sistema no busca remplazar a los sintetizadores del mercado, sino acercar la tecnología modular más compleja a un entorno intuitivo y agradable, pudiendo comunicarse con los sistemas modulares ya existentes.

Para ello se establecerán, a lo largo del trabajo, las funcionalidades básicas necesarias para hacer al sistema funcionar, se diseñarán y adaptarán los circuitos electrónicos a estas nuevas necesidades y se realizará un diseño físico de las carcasas que alojarán a cada uno de los módulos.

Palabras clave

Síntesis, sintetizador, modular, sonido.

Abstract

Sound synthesis is the art of obtaining sounds from non-acoustic methods, which may be analogic, due to small voltage variations on a electronic circuit; or digital, configuring algorithms on a processor. Synthesis investigate sound from its roots, capturing the specific pieces that make it unique: texture, shine, duration, harmony, etc.

In the past years, sound generation has evolved along technological growing, while sound synthesis has become the most usual and quick method to reflect an idea, for instance, as an instrument in a song or as a complement for special effects in a movie.

The creation of those sounds is based on modulation and timbre combinations. The synthesizer is the instrument that contains the hardware necessary to realize this operations, has been in continuous development since the start of the XX Century and is purely electronic based, which explains its constant evolution.

With the apparition of new technologies, synthesizers have been modified, reducing their dimensions and acquiring new possibilities. The digitalization of sound synthesis has simplified the use of this instruments and consequently a reduction of their price, but a vast majority of the public still prefers the physical contact with the instrument which strengthens their learning and creativity.

The complexity of sound synthesis lies in the creative use of various tools or modules that shape the signal in different ways. The communication between modules, thanks to wires of different lengths, causes timbre evolution of the sounds, but the programming of these becomes complex when you want to reach very specific details.

The cables line the front of the instrument, making it difficult to see the parameters and the controls. In turn, following the route of the signals becomes a difficult task, keeping the new artist away from this device.

Taking into account the above, this Project is proposed as a solution to the need of simplifying the interconnection of modular systems, providing clarity to the signal flow and implementing new synthesis programming environment. The system will be oriented towards a side connection of the modules, avoiding the need for cables and leaving the front of the instrument clear of obstacles. This solution also simplifies tracking the signal flow throughout the instrument, since the modules are now grouped together. The modules are also power-fed through the side connections so if a module is not being used it can be disconnected from the system and reduce power consumption.

This new system does not seek to replace the synthesizers of the market, but to bring the more complex modular technology to an intuitive and pleasant environment, being able to communicate with the existing modular systems.

To this end, the basic functionalities necessary to make the system to function will be established throughout the work, the electronic circuits will be designed and adapted to these new needs and a physical design of the housings.

Keywords

Synthesis, synthesizer, modular, sound.

Índice de contenidos

Glosario	xiii
Capítulo 1.- Introducción, motivación y objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos y fases del proyecto	4
1.4 Partes del documento	5
Capítulo 2.-Estado de la técnica	7
2.1 Historia del sintetizador	7
2.2 Tecnologías existentes	12
2.3 El sintetizador en el mercado	14
2.3.1 Integrado en carcasa	14
2.3.2 Modular	17
2.4 Tipos de síntesis	19
Capítulo 3.-Componentes del sintetizador	21
3.1 Oscilador Controlado por Voltaje	21
3.2 Amplificador Controlado por Voltaje	24
3.3 Generador de Envolvente	26
3.4 Filtro multi-modo Controlado por Voltaje	29
3.5 Generador de Ruido	33
3.6 Oscilador de Baja Frecuencia	34
3.7 Mezclador de Señal	35
3.8 Módulo de Salida	36
Capítulo 4.- Diseño propuesto y construcción	37
4.1 Justificación y condicionantes	37
4.2 Concepto creativo	38
4.3 Estructura propuesta	39
4.4 Justificación de su forma	40
4.5 Formalización de la producción	40
4.6 Referentes del nuevo diseño	41
Capítulo 5.- Arquitectura del diseño propuesto	45
5.1 Circuito del Oscilador Controlado por Voltaje	45
5.2 Circuito del Amplificador Controlado por Voltaje	50
5.3 Circuito del Generador de Envolvente	52
5.4 Circuito del Oscilador de Baja Frecuencia	57
5.5 Circuito del Filtro Controlado por Voltaje	60
5.6 Circuito del Generador de Ruido	62
5.7 Circuito del Mezclador	65
5.8 Circuito del Módulo de Salida	66
Capítulo 6.- Resultados experimentales	69
6.1 Oscilador controlado por Voltaje	71
6.2 Amplificador Controlado por Voltaje	73
6.3 Generador de envolvente	76
6.4 Oscilador de Baja Frecuencia	80
6.5 Filtro Controlado por Voltaje	83
6.6 Generador de Ruido	87
6.7 Mezclador de Señal	90

Capítulo 7.- Marco regulador, estudio socio-económico y presupuesto	93
7.1 Marco regulador.....	93
7.2 Estudio socioeconómico	95
7.3 Presupuesto	96
Capítulo 8.- Conclusiones y futuras líneas de trabajo	107
8.1 Conclusiones	107
8.2 Trabajos futuros	108
REFERENCIAS	111
ANEXOS	i
A1 ESQUEMÁTICOS.....	i
A2 CANVAS DE INNOVACIÓN	xi

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Armónicos de un piano.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1.2. Armónicos de una flauta.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1.3. Sintetizador modular</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2.1. Telarmonio en vista frontal y posterior.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.2. Theremín Figura 2.3. Trautonio</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4. Detalle del panel frontal del Minimoog</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.5. Jean-Michel Jarre entre sintetizadores</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.6. Representación de una señal sinusoidal.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7. Envolvente compleja, generada digitalmente.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.8. Detalle del panel frontal del Minibrute SE</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.9. Componentes electrónicos montados en placa.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.10. Detalle del panel posterior del Minibrute SE.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.11. Sistema modular “preparado para el despegue”</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.12. Detalle frontal, lateral y posterior de un VCO de Doepfer</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.13. Detalle de los cables</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.14. Matriz de conexión del EMS Putney.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.1. Sincronía aplicada en una señal de diente de sierra.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.2. Modulación en amplitud.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.3. Señal cuadrada siendo modulada</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.4. Etapas de una envolvente</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.5. Distintos comportamientos de la misma envolvente.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.6. Pulsos disparando envolventes.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.7. Filtro auto-oscilando.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.8. Tres filtros paso-bajo con distintas pendientes</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.9. Ruido blanco, respuesta frecuencia y energía por bandas de octava</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.10. Ruido rosa, respuesta frecuencia y energía por bandas de octava</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.11. Modulación producida por un LFO</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.12. Mesa de mezclas.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.13. Distribuidor o splitter Figura 3.14. Output. Incluye adaptador de minijack a Jack.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.1. Distintos módulos compactos Little Bits</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.2. Audio Cubes</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.3. Patchblocks</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.1. Detalle circuito VCO.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.2. Control del VCO.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.3. Salida diente de sierra.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.4. Salida PWM</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.5. Detalle del par diferencial</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.6. Circuito de disparo.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.7. Temporizador 555</i>	<i>54</i>

<i>Figura 5.8. 7555 en el circuito.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.9. Etapas de la envolvente.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.10. Etapa de control del LFO.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.11. 7555 en modalidad astable.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.12. Recorte de la publicación original de Steiner en 1974</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.13. Filtro paso alto Figura 5.14. Filtro paso bajo</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.15. Transistor con colector abierto, genera ruido térmico</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.16. Filtrado del ruido blanco</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.17. Señal aleatoria</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.18. Captura del Mezclador con dos señales.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.19. Circuito de Salida.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.20. Ejemplo del comportamiento de una señal en el módulo de salida.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.21. Filtrado de la señal de salida.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 6.1. Placas que forman el sistema.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 6.2. Simulación 3D VCO</i>	<i>71</i>
<i>Figura 6.3. PCB VCO</i>	<i>71</i>
<i>Figura 6.4. Captura del VCO.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6.5. Simulación 3D VCA</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.6. PCB VCA.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.7. Modulación en amplitud 1.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 6.8. Modulación en amplitud 2.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 6.9. Simulación 3D ADSR</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.10. PCB ADSR</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.11. Primera configuración</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.12. Segunda configuración.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.13. Tercera configuración.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.14. Cuarta configuración</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.15. Simulación 3D LFO</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.16. PCB LFO.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.17. Diente de sierra 175 mHz.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.18. Diente de sierra 10,5 Hz.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.19. Señal cuadrada en FM</i>	<i>82</i>
<i>Figura 6.20. Simulación 3D Filtro.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 6.21. PCB Filtro.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 6.22. Filtrado de diente de sierra 1</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.23. Filtrado de diente de sierra 2</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.24. Filtro oscilando.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.25. Filtrado de señal cuadrada 1</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.26. Filtrado de señal cuadrada 2</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.27. Simulación 3D Ruido</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.28. PCB Ruido.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.29. Ruido Blanco.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.30. Ruido Rosa</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.31. Simulación 3D Mezclador</i>	<i>90</i>
<i>Figura 6.32. PCB Mezclador</i>	<i>90</i>
<i>Figura 6.33. Suma de señales en el Mezclador</i>	<i>91</i>

<i>Figura 7.1. Marcado que aparecería en la etiqueta obligatoria del producto</i>	<i>94</i>
<i>Figura 7.2. Etapas en la comercialización de un producto.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 8.1. Filtro del Minimoog</i>	<i>108</i>
<i>Figura 8.2. Referencia visual en un potenciómetro</i>	<i>109</i>
<i>Figura 8.3. Magsafe de Apple</i>	<i>109</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 3.1. Formas de onda</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3.2. Tipos de filtro</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3.3. Filtrado de señal.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4.1. Referencias de diseño</i>	<i>44</i>

Glosario

CV: control por voltaje

VCO: oscilador controlado por voltaje

VCA: amplificador controlado por voltaje

ADSR: generador de envolvente de 4 etapas

LFO: oscilador de baja frecuencia

VCF: filtro controlado por voltaje

1V / oct: relación de 1V por octava

Capítulo 1.- Introducción, motivación y objetivos

1.1 Introducción

Escondido bajo la apariencia de un teclado y oculto tras el guitarrista en los conciertos de multitud de bandas de los 70, 80 y 90 se encuentra **el sintetizador**, un instrumento del cual muchos habrán oído hablar o incluso podrán haber visto en directo, pero, para la mayoría, sus posibilidades sonoras siguen aún ocultas. Su uso es habitual en la generación de cualquier sonido que no requiera de un origen acústico: animación de videojuegos, bandas sonoras, etc.

Para entender qué es un sintetizador y lo que se puede llegar a crear con él, es conveniente tener una pequeña noción musical: todo sonido se compone de dos características fundamentales, **tono** y **timbre**. Tono es lo que, comúnmente, se conoce como las notas musicales (Do, Re, Mi, etc), mientras que el timbre es aquel color especial que aporta un instrumento a la nota que tañe. Por ejemplo, si un pianista tocase una melodía en un piano y un flautista interpretase a su vez la misma melodía con una flauta ambas melodías no sonarían de la misma manera, e incluso, se podría deducir la procedencia de cada una cerrando los ojos. Un tono contendrá la parte fundamental de un sonido y los armónicos que lo acompañen definirán el timbre, y es en dicha propiedad del sonido, sobre la que se fundamentará la tecnología sobre la que está basado el sintetizador, esta herramienta camuflada de instrumento.

En las Figuras que aparecen a continuación, se representa la misma nota, pero tocada por dos instrumentos diferentes, un piano (Figura 1.1) y una flauta (Figura 1.2). Los picos

más pronunciados representan los armónicos, y se comprueba que la señal procedente del piano presenta unos armónicos más definidos frente a los de la flauta que presenta una mayor cantidad de ellos.

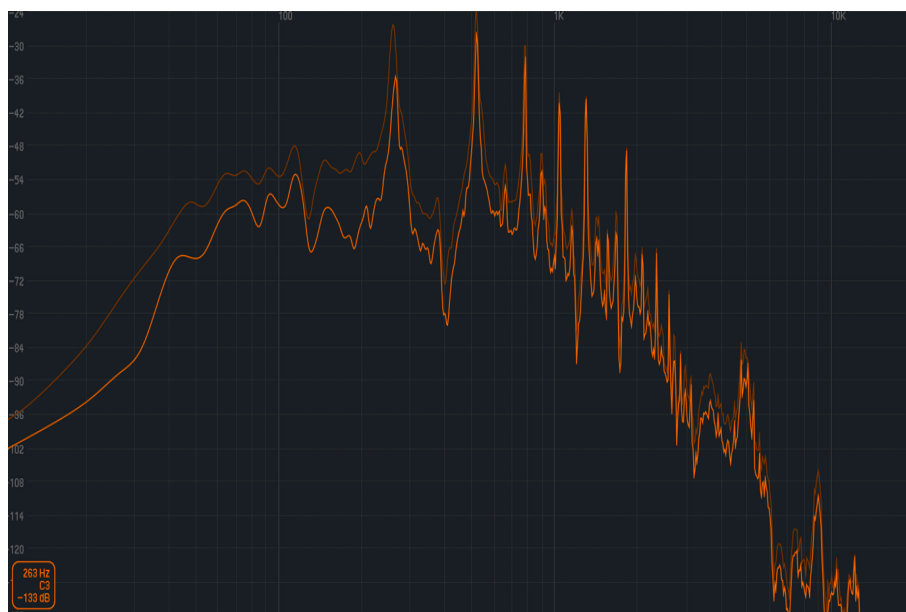


Figura 1.1. Armónicos de un piano

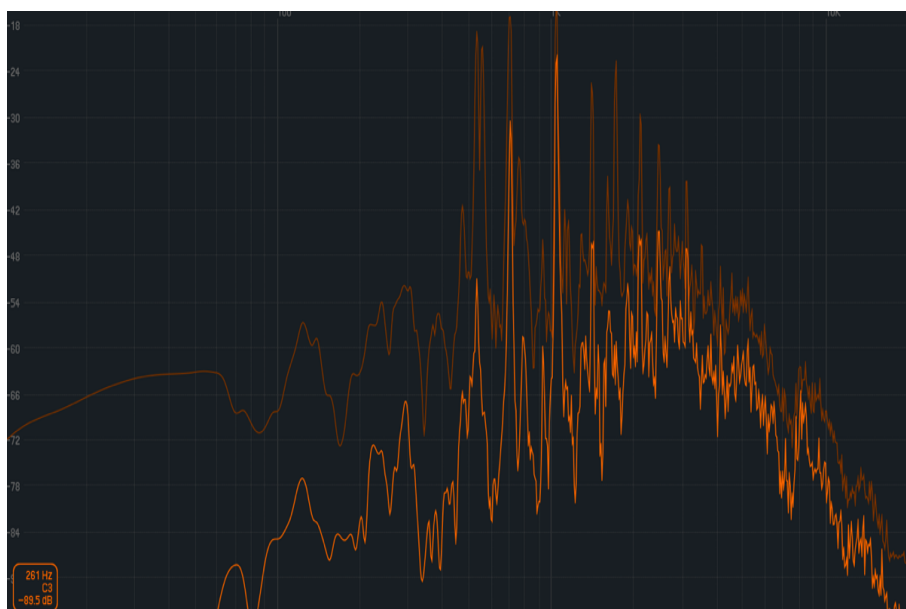


Figura 1.2. Armónicos de una flauta

1.2 Motivación

Hace años la producción de música electrónica por particulares dependía de un sinnúmero de instrumentos y aparatos, con precios desorbitados y una programación muy compleja;

esto hacia que muy pocos pudieran dar el salto a la producción, ya fuese por falta de información, por falta de dinero, o por falta de espacio. Con el tiempo, la tecnología avanzó, y los instrumentos que antes necesitaban estudios gigantescos para poder sonar conjuntamente, ahora aparecían en forma de intuitivos programas para ordenador.

El control sobre los parámetros que generan el sonido es indispensable, pero muchas veces, se acaba perdiendo la orientación artística y el instrumento comienza a resultar demasiado complejo. En el caso de los sintetizadores analógicos es difícil encontrar un término medio, un instrumento que encuentre el equilibrio entre un manejo intuitivo y una libertad expresiva sin fronteras. En la Figura 1.3 se aprecia un sintetizador modular, compuesto por multitud de componentes o módulos, cada uno con una función dentro del sistema, ya sea generando sonido o bien, modificándolo. La libertad de conexionado es absoluta, ya que las señales del sistema pueden ser direccionadas a cualquier parte de él con la ayuda de cables, pero el sistema se vuelve difícil de manejar en el momento en que se necesitan muchas conexiones.



Figura 1.3. Sintetizador modular

El trabajo que se expone a continuación surge de la unión de dos disciplinas: el control electrónico y la generación sonora, por tanto, en los siguientes capítulos se irá explicando todo lo relacionado con la síntesis y los fenómenos eléctricos que la envuelven, para acabar construyendo un sintetizador completo, con el fin de su posterior comercialización. El sintetizador que va a ser desarrollado presenta los módulos básicos y necesarios para hacer el sistema funcionar, pero se simplifica su conexionado, evitando así la necesidad de cables.

Actualmente, los módulos se incorporan unos junto a otros en maletas para su transporte, como se parecía en la Figura 1.3 y una vez se enciende el sistema todos los módulos

reciben alimentación eléctrica, aunque no se estén utilizando. Con el fin de mejorar este sistema se propone alojar los circuitos en una carcasa específicamente diseñada para este fin, robusta, manejable, intuitiva y cómoda de transportar. El conexionado de los módulos se realizará por contacto de las caras laterales de las carcasas y estas, a su vez, transmitirán la alimentación necesaria para que los módulos funcionen.

Esta funcionalidad novedosa no sólo se cree que permitirá una mayor distinción del flujo de las señales dentro del sistema, evitará los cables, favorecerá su portabilidad y simplificará el aprendizaje de la síntesis, sino que también permitirá que los módulos que no se encuentran conectados no reciban corriente eléctrica, reduciendo el consumo global del sistema.

Este trabajo se presenta a la modalidad de TFG Emprende, debido a la idea innovadora que conlleva, y por tanto, se profundizará en el modelo de negocio y en el estudio socio-económico en un trabajo paralelo y complementario al que aquí se expone.

1.3 Objetivos y fases del proyecto

El objetivo del presente documento es:

Presentar y justificar un diseño de sintetizador alternativo a los ya existentes, junto con la construcción etapa a etapa del mismo.

Para ello es necesario alcanzar los siguientes sub-objetivos:

- Distinguir las posibilidades y limitaciones que presentan los distintos tipos de sintetizadores existentes. Conocer el mercado actual y la historia de su invención, así como las tecnologías analógica, digital e híbrida.
- Indagar en todos los módulos fundamentales que componen un sintetizador, desde la función que desempeñan hasta su diseño electrónico.
- Situar este producto en un entorno socio-económico actual y compararlo con otras soluciones similares.

Las fases de desarrollo del proyecto son las siguientes:

- Fase de búsqueda de información y aprendizaje: La primera fase consistirá en aprender sobre el mercado de los sintetizadores a lo largo de toda su evolución y de los módulos más representativos que componen el sistema.

- Fase de prototipado electrónico: En esta fase se simularán los circuitos, con el software LTSpice, y se ensamblarán físicamente en una protoboard, para ser estudiados.
- Fase de diseño físico de la electrónica: En esta fase se diseñará la placa de circuito impreso en la que irán situados los componentes, mediante el software KICAD. Las placas se realizarán por la técnica de fresado en el taller de la UC3M. Una vez ensambladas, se comprobarán las placas de manera individual, anotando sus consumos de corriente y resultados obtenidos. Posteriormente se realizará un ensayo de manera conjunta y se anotará el consumo total del sistema.
- Fase de diseño de la carcasa: En esta fase se diseñará una carcasa robusta que aloje los circuitos de manera segura en su interior. Se harán pruebas con distintos materiales y se decidirá el acabado final. Se planteará un conexionado lateral que permita la unión cómoda y segura entre módulos evitando posibles errores del usuario como, por ejemplo, la comunicación entre dos salidas.

1.4 Partes del documento

-El **Capítulo 2** incide en el estado de la técnica, desarrollando toda la historia y evolución del sintetizador como instrumento musical, haciendo hincapié en las tecnologías de generación sonora y en el extenso mercado de módulos y teclados existente.

-El **Capítulo 3** esclarece de qué está compuesto un sintetizador, presentando tanto módulos de generación de sonido como módulos de control. Este capítulo también contará con una breve guía de sus posibles usos.

-El **Capítulo 4** describe el diseño propuesto, justificando la tecnología empleada y los módulos presentes en el sistema. Cubrirá tanto la construcción de la carcasa como la implementación de los circuitos en una placa de circuito impreso.

-El **Capítulo 5** detalla el funcionamiento de la arquitectura electrónica tras el sintetizador, empleando exclusivamente componentes discretos.

-El **Capítulo 6** muestra los resultados experimentales alcanzados, los consumos de corriente de cada módulo, así como el acabado final tanto de las placas como de las carcasas, a lo largo de las distintas fases de prototipado.

-El **Capítulo 7** presenta un análisis del impacto socio-económico, el presupuesto necesario para la construcción de este sistema y todo lo relacionado con la normativa aplicada y el marco regulador.

-El **Capítulo 8** contiene las conclusiones sacadas de la realización de este proyecto, e incidirá en futuras líneas de trabajo en caso de querer seguir mejorando el sistema.

Capítulo 2.-Estado de la técnica

2.1 Historia del sintetizador

La historia del sintetizador viene ligada a los intentos del ser humano, no sólo de generar señales audibles, sino de poder controlarlas y modificarlas con la ayuda de otras señales eléctricas. A lo largo de los años estas herramientas han ido reduciéndose en coste y tamaño y lo que se inició como experimentos de laboratorio ha acabado desarrollando toda una cultura musical basada en este invento.

El primer intento satisfactorio de generar sonido por medios puramente eléctricos se da en 1897 con la invención del telarmonio por Thaddeus Cahill. Este primer instrumento electrónico y polifónico tenía el tamaño de una habitación, apreciable en la Figura 2.1, su coste fue de 200.000 dólares. El funcionamiento de este instrumento primigenio estaba basado en una rueda tonal electromagnética, compuesta por una bobina y unos discos abultados en rotación. Cada disco poseía un determinado número de bultos que, al rotar próximos a la bobina, inducían una corriente eléctrica que generaba una frecuencia asociada, y por tanto, notas musicales. Aunque se inventó pensando en hacer audibles las señales de clave Morse, su aplicación musical causó gran impacto, pero solía presentar defectos al reproducir distintas notas, ya que con cada nueva nota se percibía un golpe metálico [Williston, J].

Las distintas posibilidades de control siguieron apareciendo y en 1919 Lev Termen inventó el instrumento que lleva su nombre, el theremín. El ejecutante no tiene contacto con él, tan sólo con la ayuda de dos antenas y la carga almacenada entre el cuerpo que lo toca y la antena, se puede modificar tanto el tono como la amplitud del sonido que produce. Sus sonidos espaciales y aflautados son bastante particulares, actualmente el

acceso a muestras de sonido de estos instrumentos es posible gracias a la gran cantidad de videos y de información que puede proveer la red.

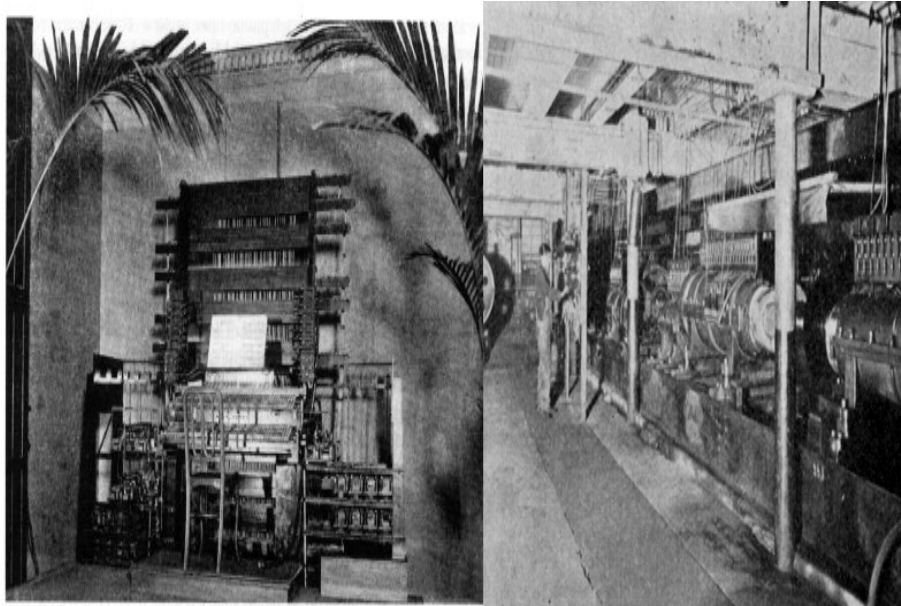


Figura 2.1. Telarmonio en vista frontal y posterior

Como se puede comprobar en la Figura 2.2, un hombre ejecuta una partitura sobre un theremín. Sosteniendo su mano izquierda sobre una antena curvada es capaz de controlar el volumen de un tono, mientras que la distancia de su mano derecha hasta la otra antena definirá la frecuencia de este tono, cuanto más cercana, más agudo.



Figura 2.2. Theremín



Figura 2.3. Trautonio

El trautonio, ideado por Friedrich Trautwein en 1924 empleaba lámparas de neón de bajo voltaje (Figura 2.3). Fue el primero que permitía una técnica substractiva, es decir, la capacidad de poder sustraer o filtrar armónicos que no dan lugar al sonido deseado. Esta

técnica se mantendría hasta nuestros días y, aunque más adelante se explicarán las distintas técnicas de síntesis, cabe recalcar que la substractiva marcará un antes y un después [Vail, M].

En 1929 se empieza a generalizar el empleo del término sintetizador como una máquina capaz de generar distintas formas de onda, que son el origen armónico de cualquier sonido, y ya en las décadas de los treinta y cuarenta surgirían los elementos individuales o módulos, que constituirán la base de sintetizadores modernos, estos se analizarán en profundidad en el **Capítulo 2**. En los próximos años seguirían surgiendo distintos instrumentos manejados por electricidad, pero aún eran demasiado complejos y pesados para tener un uso generalista.

Con el inicio de los ordenadores, surgió entre 1951 y 1957 el Mark I y el Mark II en los laboratorios de RCA. Mediante papel perforado y sus doce osciladores, que representaban los doce tonos presentes en una octava, su funcionamiento era complejo. Costaba unos 500.000 dólares y medía 5 metros de largo por 2 de alto.

En 1959 un ingeniero alemán llamado Harald Bode desarrolló un sintetizador modular y procesador de señales y, en 1961, publicó un artículo explorando las ventajas de los nuevos transistores frente a las antiguas válvulas de vacío. La evolución de los transistores y su reducción paulatina en coste y tamaño permitió pasar de engorrosas máquinas del tamaño de habitaciones a cómodos instrumentos que se tocaban mediante un teclado similar al de los pianos [Holmes, T].

A mediados de los años 60 un ingeniero electrónico con un doctorado de la Universidad de Cornell empezó una revolución musical, este personaje era Robert Moog. A la vez que Donald Buchla, e inspirados por el trabajo de Bode, diseñaron sus propios sistemas modulares.

Con el fin de acercar estos avances a la comunidad musical, Moog incorporó el clásico teclado, ya que, en su origen, el tono se seleccionaba con una rueda dedicada. Hasta ese momento, el control de tono se debía hacer a oído, ya que la selección de dicho tono no era musical sino frecuencial, pero, mediante un ajuste en sus circuitos, estableció la relación logarítmica de un voltio por octava (**1V / oct**), facilitando el uso por artistas al establecer la tonalidad en saltos de notas en vez de en saltos de Hertzios.

Ambos, Moog y Buchla, diseñaron módulos controlados por voltaje (**CV**), donde una señal eléctrica variable era capaz de modificar determinadas funciones de otros módulos. Hasta ese momento si un artista, por ejemplo, quería infundir trémolo a su sonido debía subir y bajar alternativamente el control dedicado para el volumen. Gracias al control por voltaje podía establecer que una señal oscilante, que simulaba el movimiento de la mano sobre la rueda, controlara dicho parámetro de volumen, dejándole ambas manos libres para infundir carácter en otro aspecto sonoro o poder tocar el teclado.

El Minimoog (Figura 2.4) revolucionaría la síntesis musical por su simplicidad y posibilidades de control, acercando una tecnología propia de un laboratorio electrónico a las casas de miles de aficionados a la música de todo el mundo [Pinch, T]. Su panel frontal invitaba a modificar los parámetros de los que consistía, organizados en secciones cómodas de aprender y que aún perduran: el banco de osciladores, el mezclador, el filtro y las envolventes.



Figura 2.4. Detalle del panel frontal del Minimoog

A raíz de estos avances empezaron a surgir multitud de compañías que comercializaban sus propias máquinas, tales como Oberheim, la japonesa Roland o Korg. Cada una de ellas aportaba un sonido distinto y característico, debido a las interconexiones presentes en sus módulos, y nuevas funcionalidades, como por ejemplo, Sequential Instruments al introducir la polifonía en sus teclados, es decir, la capacidad de tocar más de una nota a la vez, ya que hasta el momento los sintetizadores eran monofónicos.

Los sintetizadores comenzaron a popularizarse y multitud de bandas y músicos de la época empezaron a adoptar sus múltiples posibilidades artísticas. De entre todos destacan las figuras de Vangelis, compositor, entre otras muchas piezas, de la Banda Sonora Original de la película Carros de Fuego; y de Jean-Michel Jarre. Por poner un ejemplo de la pasión que despertaban los espectáculos de J.M. Jarre, en 1997 con su Tour Oxygene reunió a más de 3,5 millones de personas en Moscú. Aquí combinaba a 6 músicos que le acompañaban junto con más de 20 sintetizadores, sin presencia de instrumentos convencionales. En la Figura 2.5 aparece un fotograma de una de sus actuaciones en París, rodeado por sus instrumentos, disposición que le permitía la manipulación cómoda de todos ellos. En esta fotografía se aprecian hasta 20 sintetizadores diferentes, mientras que muchos otros se sitúan fuera del plano. Otros tantos músicos que usaron el recurso del sintetizador fueron ABBA, The Beatles, BeeGees, David Bowie, Depeche Mode, The Chemical Brothers o incluso Michael Jackson, por citar a unos pocos [Cateforis, T].



Figura 2.5. Jean-Michel Jarre entre sintetizadores

Posteriormente, se ha empleado en composición de bandas sonoras por los sonidos impactantes que es capaz de producir. En esta categoría destaca Hans Zimmer, compositor de BSO de más de 20 películas de éxito.

Al ser posible su control por CV y con la evolución de la tecnología y el lenguaje MIDI (abreviatura de Musical Instrument Digital Interface), fueron surgiendo multitud de posibilidades de manejo, sin ser necesario un contacto físico. La digitalización de su control permitió que, hasta el más enrevesado de los experimentos, tales como conectar cables a frutas o el movimiento de un bailarín, pudiera modificar ciertos parámetros del sonido [Pro, Q]. En 2017, con la llegada de la tecnología de Realidad Virtual, comienzan a aparecer sintetizadores que se manejan desde menús digitales que flotan ante los ojos de los intérpretes, gracias a unas gafas especiales.

En los años 90, los primeros sintetizadores puramente digitales comenzaron a surgir, en forma de software. Se intentaba simular el flujo de señal y, por tanto, el sonido de los sintetizadores analógicos, pero más adelante empezaron a aparecer nuevas técnicas de síntesis y con muchas más posibilidades.

Actualmente la síntesis está en su punto más brillante y los sintetizadores se pueden encontrar en todos los formatos, tamaños y precios. Korg y Moog comercializan hoy en día sintetizadores en formato App (aplicación para dispositivos móviles) y Arturia ha recreado el icónico sonido de más de una veintena de sintetizadores analógicos [Arturia

14]. Por suerte, las fronteras entre mundos digitales y analógicos, marcas y módulos son cada vez más difusas y es posible establecer comunicaciones entre todos los sistemas.

2.2 Tecnologías existentes

Cualquier sonido puede tener un origen analógico, digital o una combinación de ambos, denominado híbrido, y la importancia de este origen, radica en que puede definir el carácter, la robustez, la calidez o la nitidez que tendrá dicho sonido. Existe una discusión sobre si el origen analógico del sonido es mejor o peor que el origen digital pero las cualidades de un sonido son puramente subjetivas y ese debate no puede tener un vencedor. La definición del término analógico y sus diferencias con el mundo digital ayudará a distinguir de una manera clara como este hecho afecta al sonido producido.

La tecnología analógica es capaz de generar sonido por las propiedades físicas de los elementos que constituyen el circuito, tan sólo será necesaria una corriente de alimentación y los componentes discretos, tales como resistencias y condensadores, ordenados y organizados meticulosamente, se encargarán del resto. El comportamiento analógico podría asemejarse a algo orgánico, vivo, real, y continuamente variable siendo la definición recogida por el diccionario: “dicho de un aparato o un sistema: Que presenta información, especialmente una medida, mediante una magnitud física, continua y proporcional al valor de dicha información”. Si la salida de un sintetizador se mide con un osciloscopio se podrá observar que la forma de onda que adquiere el voltaje es continua, opuesto a la característica forma paso a paso de una señal digital, como se puede observar en la Figura 2.6.

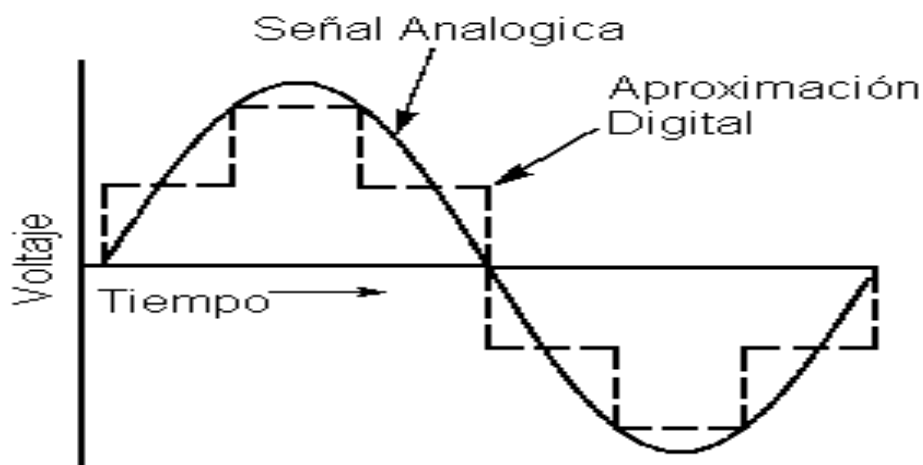


Figura 2.6. Representación de una señal sinusoidal

La generación y el control de la electricidad son la base de la ingeniería electrónica y, en un instrumento que genera audio mediante el control ordenado de electrones, el desarrollo de estos pilares fundamentales otorgará un sonido cálido y con un grosor inigualable

[Pelgrom, M]. Aún así el sonido analógico no es perfecto, presenta cierto ruido natural debido a los componentes electrónicos que lo forman. Estos tienen propiedades eléctricas dependientes del entorno y de la temperatura a la que se encuentren, es habitual el dejar un sintetizador analógico en reposo los primeros diez minutos de uso para que el comportamiento de los componentes se estabilice. Estas pequeñas imperfecciones incontrolables definen el carácter analógico de los sonidos y forman parte de la esencia de cualquier melodía interpretada por un sintetizador.

Aunque los sintetizadores analógicos fueron extremadamente populares durante muchos años, las ventas fueron decreciendo paulatinamente ya que la industria evolucionó hacia productos menos costosos y con mayores facilidades de manufactura. Los sintetizadores digitales dependen de microprocesadores para hacer el trabajo duro, necesitando la programación de algoritmos que, mediante complejas operaciones matemáticas generan señales armónicas. Por tanto, la similitud de un sonido analógico con uno digital depende íntegramente de la exactitud de dicho algoritmo, y conseguir el carácter analógico de manera digital es el “Santo Grial” de los diseñadores de software musical. Incluyen artefactos de conversión digital lo que supone un gran obstáculo para reproducir fielmente el carácter de un sonido al sólo disponer de 1’s y 0’s, sin embargo, simplifican el control de cada sonido y ofrecen multitud de posibilidades que serían extremadamente complejas de realizar con circuitos analógicos.

Un ejemplo de esta complejidad se ve a la hora de trazar cualquier envolvente, figura geométrica con un principio y final nulos que definirá el control de un parámetro del sintetizador. Con un par de pulsaciones con el ratón se obtienen infinitas combinaciones de trazados lineales y curvados, tormentosa tarea para diseñar de manera analógica, con un circuito individual para cada una de las etapas definidas con un punto blanco en la Figura 2.7.

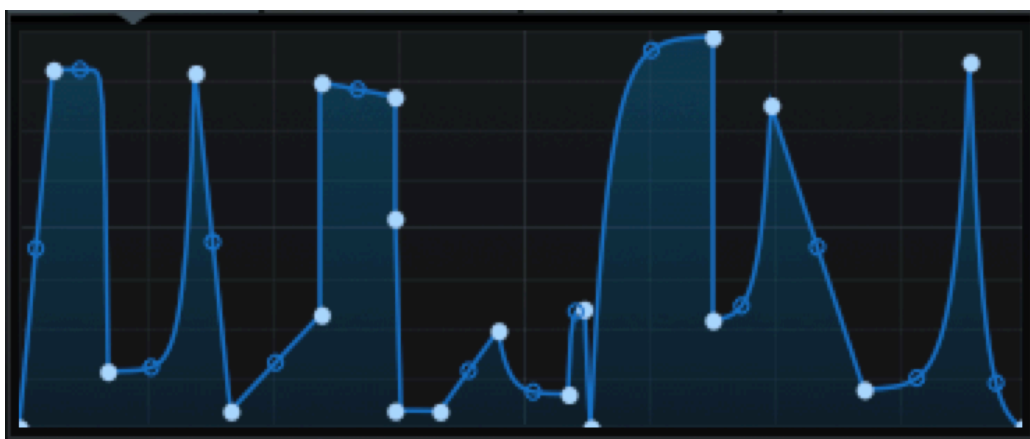


Figura 2.7. Envolvente compleja, generada digitalmente

De lo mejor de ambos mundos surge la tecnología híbrida, capaz de combinar motores analógicos y digitales para generar y controlar el sonido, precisamente esta tecnología sólo se encuentra de manera física. Al pasar una señal digital a través de un circuito de

componentes discretos se aprovecha el color natural que estos aportan y se consiguen armónicos que no se pueden obtener de manera exclusivamente digital. A su vez el control digital puede gobernar una fuente analógica y otorgarle un movimiento a sus parámetros que logre resultados únicos.

2.3 El sintetizador en el mercado

Las tecnologías presentadas en el apartado anterior pueden aparecer en el mercado en tres formatos físicos distintos: integrado en carcasa, semi-modular y modular. Estos tres formatos se distinguen al permitir modificar, o no, el camino que sigue el sonido a través de los distintos elementos que constituyen el sistema; y el conocer sus diferencias será fundamental para plantear las alternativas de diseño del sintetizador propuesto.

Distinguiremos entre:

- Funcionalidades y limitaciones de cada uno de ellos
- Diseño físico

2.3.1 Integrado en carcasa

En un mismo recipiente se alojan los módulos que componen el sintetizador y su interconexión es exclusivamente la ofertada por el diseñador [Jenkins, M]. El flujo de la señal obedece a una estructura lineal, relativamente sencilla, donde el sonido sigue una única dirección y va pasando por distintos componentes que lo modifican de alguna manera.

En el Apartado 1.1 se presentó el Minimoog (Figura 2.4), el sintetizador monofónico integrado más icónico y comercializado a finales de los 70, pero en la Figura 2.8 aparece el MiniBrute, tecnología analógica presentada en 2012. Si se comparan ambos diseños, se observa que la distribución de los parámetros prácticamente no se ha modificado.



Figura 2.8. Detalle del panel frontal del Minibrute SE

La tecnología que ofrece el sintetizador integrado analógico está restringida a la portabilidad y resistencia del instrumento. Tomando como ejemplo la Figura 2.8, se distinguen cuatro secciones que obedecen a la ruta que sigue el sonido desde su origen hasta su escucha, siendo la primera un oscilador con mezclador incorporado, un filtro, una envolvente de volumen de 4 etapas y varios moduladores de señal situados en la franja inferior. Aunque los módulos que componen un sintetizador se explicarán con mayor detalle en el [Capítulo 2](#), es conveniente conocer como están dispuestos espacialmente estas funcionalidades básicas para valorar el aprovechamiento del espacio en un teclado real.

La principal limitación en las funcionalidades que presenta un sintetizador integrado es su tamaño, aunque empresas como Korg y Behringer han sido capaces de añadir funcionalidades nuevas a sus teclados apoyados en la tecnología SMD (Surface Mount Technology), ya que la tecnología de montaje superficial favorece el ahorro de espacio, la producción automatizada y el abaratamiento de costes. La diferencia de tamaño entre componentes es exagerada, como se puede comprobar en la Figura 2.9, donde se representa un componente Through Hole (R27) y otros dos SMD (R37 y R36) justo debajo.

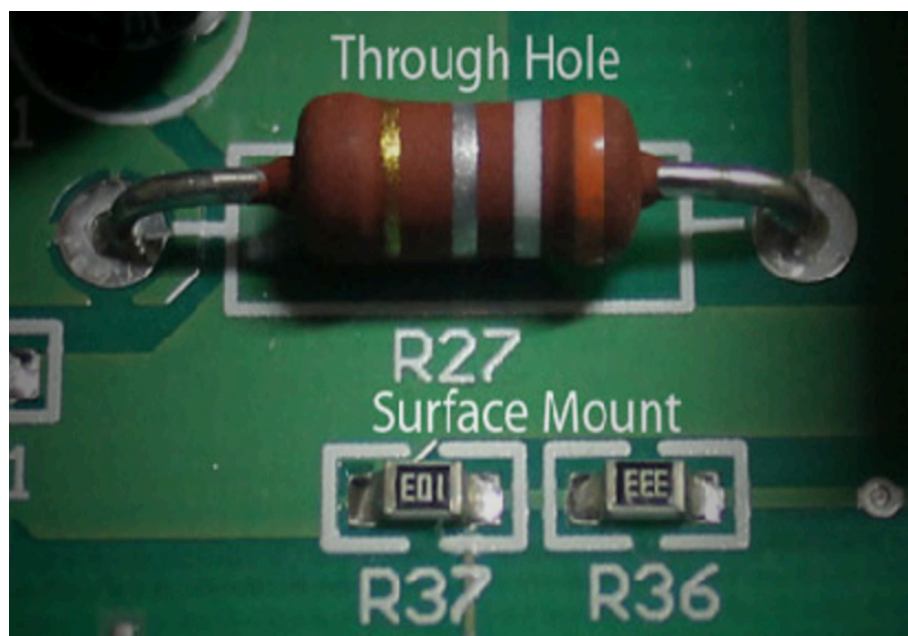


Figura 2.9. Componentes electrónicos montados en placa

Al estar orientados a teclistas, lo habitual es que los sintetizadores integrados se circunscriban exclusivamente a incluir los módulos fundamentales comentados anteriormente, pero algunas de las características que pueden llegar a integrar son:

- **Bancos de “presets”**, con la ayuda de microprocesadores, se almacenan en memoria configuraciones de parámetros guardadas por el fabricante o el usuario [Friedman, D].

- **Polifonia**, implica la capacidad de poder tocar dos o más notas a la vez, por lo que precisa de un circuito independiente para cada voz extra [McGuire, S]. Pocos sintetizadores analógicos la integran, y, los que lo hacen, solventan el problema con SMD, como el KORG MINILOGUE.
- **Modulation y Pitch**, dos ruedas, situadas cerca del teclado que permiten un manejo más rápido de ligeras variaciones de modulación y tono, respectivamente. Ambas ruedas son visibles en la Figura 2.8, situadas en el extremo izquierdo del panel frontal del MiniBrute.
- **Entradas y salidas de control analógico y digital**, habilitan el conexionado del sintetizador con otros sistemas e instrumentos. La integración digital mejora año tras año para facilitar la inclusión de estos instrumentos en los estudios modernos. En la Figura 2.10, perteneciente al MiniBrute de la compañía francesa Arturia, podemos comprobar algunas de las conexiones habituales de un sintetizador integrado (a la izquierda señales analógicas de Control por Voltaje y a la derecha conexionado digital por MIDI y USB-B).



Figura 2.10. Detalle del panel posterior del Minibrute SE

- **Secuenciadores**, sistemas en los que se programa una secuencia de notas y esta se reproduce cíclicamente. Hay que tener en cuenta que cada paso de la secuencia equivale a un voltaje determinado por lo su uso puede aplicarse en multitud de parámetros, por ejemplo, si se aplica a la entrada de tono de un Oscilador Controlado por Voltaje, se reproducirá una melodía.

El precio de los sintetizadores integrados puede variar desde unos cientos de euros a cerca de 5000, costando incluso más en algunos instrumentos, bien por la marca o por su sonido icónico.

En resumen, un sintetizador integrado en carcasa tiene su principal limitación en el conexionado que permite, debido al espacio que ocupa. Al estar orientado hacia teclistas profesionales que requieren cierta portabilidad, sólo se demanda un número de modulaciones y efectos limitado. A medida que se necesita incluir una mayor cantidad de parámetros modificables, el área destinada a situar los potenciómetros de control se

vuelve insuficiente, precisaría de una navegación a través de menús para modificar los parámetros y por tanto de un pequeño motor digital, saliendo del terreno de lo puramente analógico.

Este dilema entre tamaño y funcionalidades se resuelve con el sistema modular, donde el espacio únicamente estará limitado por la capacidad de la habitación donde se encuentre.

2.3.2 Modular

La pura libertad creativa se alcanza con la interconexión de un sistema modular completo. La comunicación directa entre la multitud de módulos que existen permite al artista esculpir a su gusto el sonido deseado y combinarlo de las maneras más extravagantes y originales que se le ocurran. Al no tener una limitación en el espacio o en el flujo que sigue la señal está compuesto por algunas de las partes básicas que constituyen los sintetizadores integrados en carcasa junto con muchas otras de funcionalidades más avanzadas.

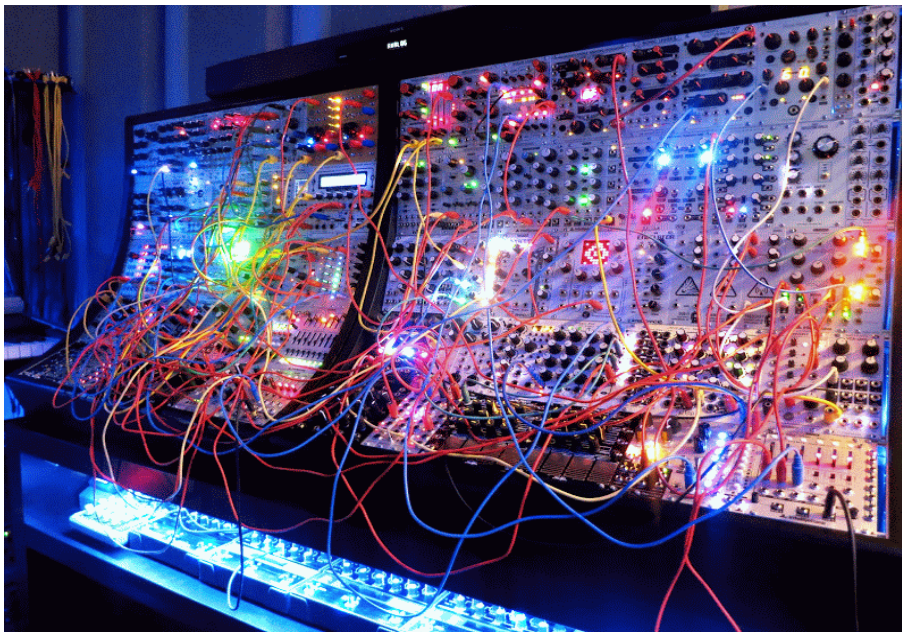


Figura 2.11. Sistema modular “preparado para el despegue”

Gracias al control por voltaje se pueden establecer qué señales modulan a los parámetros de un sonido, y así obtener nuevos armónicos mucho más complejos e interesantes. Por ejemplo un secuenciador podría establecer las notas que suenan por compás mientras una señal oscilante triangular marca el volumen de la melodía, partiendo y acabando en un volumen nulo y alcanzando su máximo a mitad de la secuencia. El límite en su conexionado depende íntegramente del esfuerzo del ejecutante y su creatividad a la hora de direccionar las señales que producen sus módulos. Mediante unos pocos módulos se puede obtener el producto armónico que se produciría con un integrado en carcasa, pero mediante la adición de muchos más se puede llegar a tener un instrumento realmente

grande y complejo, un verdadero coloso del sonido que puede ocupar paredes enteras [Rincón, J].

El diseño corre a cuenta de cada uno y aquí es donde realmente se ven cosas sorprendentes, donde algunas estructuras se asemejarían más a la cabina de mando de un avión que al de un instrumento.

Los módulos, inicialmente, seguían un esquema de diseño limitado en altura, de tal forma que se pudieran ubicar unos a continuación de otros en una misma estructura horizontal. Esta altura es prefijada por el fabricante y cada uno establece un “standard” propio, limitando la integración de módulos de distintos fabricantes, destacando los sistemas Buchla y Moog. A mediados de los 90 se estableció un nuevo estándar en la altura de los módulos originado por los fabricantes DIY ¹ “Doepfer” y “Synthesizers.com”. Pronto se adoptó este nuevo formato, denominado Eurorack, y surgieron marcas que trabajan exclusivamente en él. Actualmente es el más extendido ya que permite recopilar distintos módulos de diversos fabricantes y unirlos en una sola máquina, permitiendo tener en un mismo sistema módulos comerciales con otros DIY (Do It Yourself / Hazlo Tú Mismo).

El fabricante Doepfer, surgió como una pequeña compañía asentada en Gräfelfing, Alemania, que se dedicaba a comercializar sus módulos mediante el sistema DIY [Doepfer 15]. Proporcionaban kits que ya contenían los componentes, PCB y carcasas de los módulos para que el comprador se lo montara en casa. Mediante este sistema reducían costes sin perder calidad. Su sistema fue empleado por el grupo alemán Kraftwerk, precursores de toda la música electrónica que se produce hoy en día, fijada en compases de 4/4.

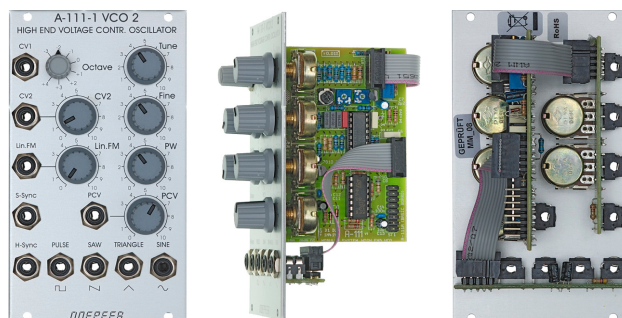


Figura 2.12. Detalle frontal, lateral y posterior de un VCO de Doepfer

Un módulo está compuesto por entradas, salidas y potenciómetros que permiten la modificación de parámetros y la interconexión de estos módulos se realiza mediante cables Jack, mini-Jack o Banana (representados en la Figura 2.13), que pueden tener una longitud de pocos centímetros a varios metros. Estos cables definen el flujo de trabajo y, si el sistema es grande, pueden llegar a dificultar y entorpecer al artista.

¹DIY—fenómeno muy extendido por el cual un particular se diseña sus propios módulos, los construye y los ensambla en su propio sistema modular. También aparecen compañías que venden sus módulos en formato kit, incluyendo el circuito impreso, todos los componentes necesarios y un manual de montaje, abaratando costes.



Figura 2.13. Detalle de los cables

También pueden aparecer matrices de conexión, de tal forma que, internamente, todos los módulos están conectados y mediante una matriz se puede elegir que señal de salida enviar a una entrada. En la Figura 2.14 se representa la matriz de conexión de un sintetizador integrado en carcasa, el legendario EMS Putney VCS3, un sistema semi-modular, capaz de combinar la portabilidad de un integrado en carcasa con la libertad del ruteo de señal.

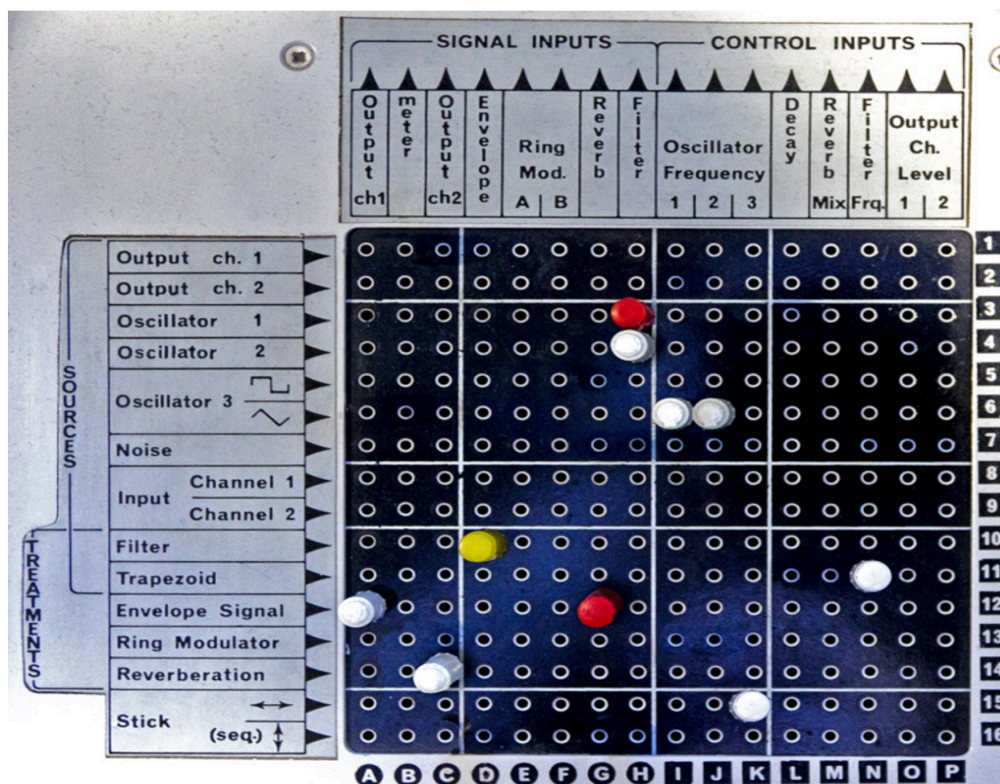


Figura 2.14. Matriz de conexión del EMS Putney

2.4 Tipos de síntesis

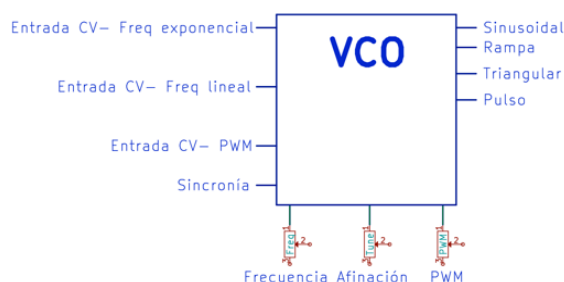
La generación de sonido aparece en multitud de formas y aunque la más propagada es la substractiva conviene conocer las demás vertientes [Wang, L].

- **Aditiva.** La onda sinusoidal produce tonos puros, sin armónicos. Mediante la suma de ondas sinusoidales se añaden los armónicos deseados. Fue el primer tipo que existió.
- **Substractiva.** Es la más generalizada. Partiendo de una señal de audio rica en armónicos se filtra sucesivamente para variar su timbre.
- **Formant.** Simula voces y se asienta en emplear armónicos de un sonido original aumentando su resonancia [Miranda, E].
- **FM.** Genera nuevos armónicos al superponer osciladores que se modulan en frecuencia unos a otros [Hund, A].
- **Granular.** Emplea granos, pequeñas muestras de sonido de 1 a 50 ms superpuestas. Se puede variar la forma de la onda, la envolvente, la duración, la posición estéreo y la densidad de los granos [Noever, P].
- **PM.** Cambia la fase con una onda moduladora.
- **PD.** Parte del mismo concepto que PM, pero usa moduladores lineales, consiguiendo efectos más bruscos y de distorsión.
- **Vector.** Mediante un joystick se dibuja una trayectoria espacial que posteriormente seguirá el sonido.
- **Síntesis de modelado físico.** La forma del sonido a generar es calculada por algoritmos matemáticos que buscan la aproximación del sonido al de un instrumento real. Se fundamentan en leyes físicas, como, por ejemplo, en un tambor, la energía que se propaga por el golpeo de una membrana con cierta tensión.

Capítulo 3.-Componentes del sintetizador

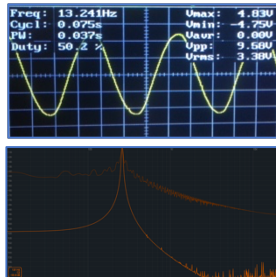
En este Capítulo se presentan ocho de los módulos más comunes en todo sintetizador y con funcionalidades imprescindibles para el buen control del sonido. Cada módulo introducido cuenta con una descripción de su funcionamiento, de las entradas y salidas que permiten la modificación o la generación de señales y algunos ejemplos de su uso.

3.1 Oscilador Controlado por Voltaje

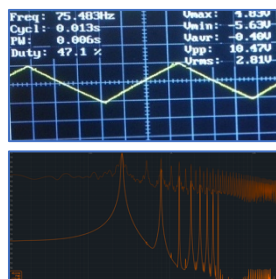


El VCO (Oscilador Controlado por Voltaje) es el núcleo de cualquier sintetizador. Su circuitería produce oscilaciones dentro del rango audible (20-20.000 Hz) y las distintas formas de onda que origina son impulsos perfilados de diferente manera. Cada una de estas formas de onda tienen un característico conjunto de armónicos que les otorgan un timbre distintivo. Con experiencia se puede acabar distinguiéndolas con tan sólo escucharlas.

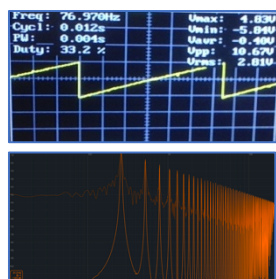
Todos los osciladores son capaces de generar distintas formas de onda y la técnica más extendida para obtenerlas todas es el **waveshaping** [Engineering, A]. El oscilador genera una forma de onda inicial, por ejemplo, una señal triangular, que es conducida posteriormente a distintos circuitos que la perfilarán hasta obtener el resto de formas de onda. La forma de onda inicial más extendida es la de diente de sierra, aunque también se pueden encontrar núcleos de onda triangular.



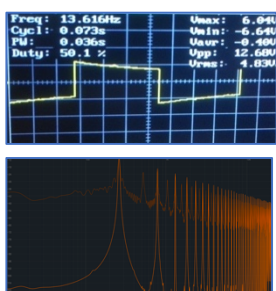
Sinusoidal. Es la forma de onda más pura y es frecuente encontrarla en la naturaleza. Debido a su forma redondeada no presenta ningún armónico, por tanto, cualquier tipo de onda puede construirse con la suma de ondas sinusoidales (teorema de Fourier).



Triangular. Es muy similar a la sinusoidal por su comportamiento progresivo, pero el vértice infunde armónicos que la sinusoidal no manifiesta.



Diente de sierra. Esta onda presenta un sonido duro y ruidoso, es empleada habitualmente para conseguir timbres similares a los presentes en instrumentos de viento. Contiene todos los armónicos en relación geométrica.



Pulso o rectangular. Esta onda sólo tiene armónicos impares, en amplitud descendente. El ancho de pulso puede ser seleccionado con el potenciómetro de PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y también modulado por una señal entrante aplicada a la **entrada PWM**.

Tabla 3.1. Formas de onda

La función del VCO va más allá de la producción de formas de onda y su principal característica es que puede responder al control por voltaje, ajustando la frecuencia de sus ondas a la señal entrante. Anteriormente se expuso la relación de 1V por octava

introducido por Moog, y es por esta razón que los VCO deben ser calibrados cuidadosamente para mantener esta relación durante varias octavas. Si aplicamos una tensión de 2V a la *entrada de CV lineal* obtendremos una señal de 200 Hz, y si aumentamos dicha tensión a 3V la señal producida será de 300 Hz. En el plano musical, se aumenta una octava completa al aumentar al doble la frecuencia, por ejemplo, un La4 son 440 Hz, mientras que un La5 son 880 Hz. Si aplicamos la tensión del ejemplo anterior a la *entrada de CV exponencial* obtendremos 200 Hz con 2V, pero 400 Hz con 3V, ya que estaríamos subiendo una octava completa al aumentar 1V la señal entrante.

La selección de frecuencia también se puede hacer de manera manual con dos potenciómetros dedicados: el de frecuencia, que selecciona saltos de octava, y el de afinación, que modifica ligeramente el valor de la tensión para permitir afinar el instrumento.

La *entrada de sincronía* permite la comunicación entre varios osciladores y resetea el oscilador cuando la señal entrante acaba su ciclo, de tal manera que ambos ciclos, el entrante y el generado por el oscilador comienzan a la vez. En la Figura 3.1, que se muestra a continuación se observa que la señal de diente de sierra acaba súbitamente su ciclo y se resetea, al recibir un pequeño pulso en la entrada de sincronía. Aparecen representados por este orden: la señal original del VCO, los pulsos entrantes en la entrada de sincronía y la señal resultante.

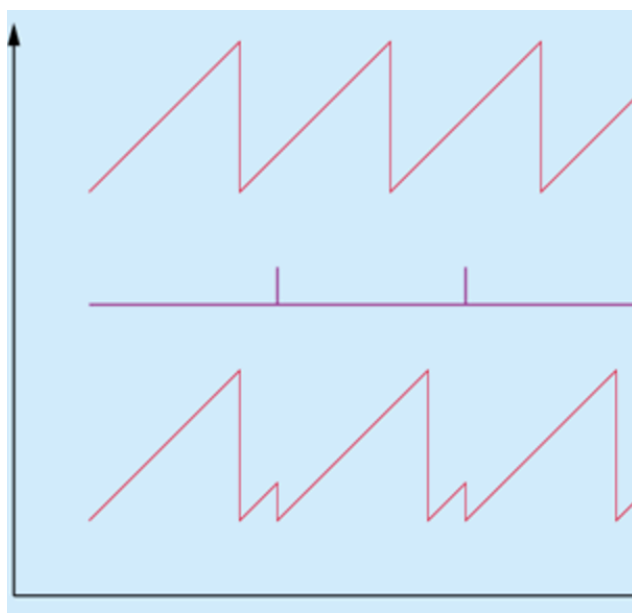
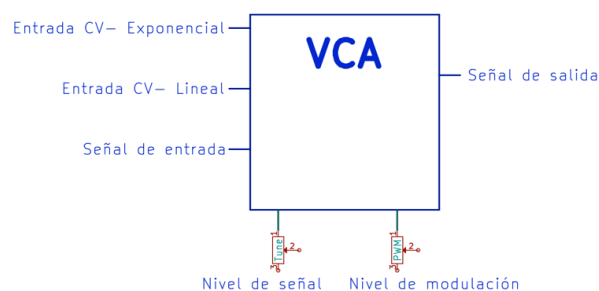


Figura 3.1. Sincronía aplicada en una señal de diente de sierra

El oscilador se emplea como origen de sonidos, pero es posible utilizarlo también como modulador. Al ser un elemento oscilante, si su señal de salida se aplica a la entrada de CV de otro oscilador se obtendrán resultados propios de la síntesis FM o de frecuencia modulada.

3.2 Amplificador Controlado por Voltaje



El VCA (Amplificador Controlado por Voltaje) es un módulo que permite el uso de un voltaje para controlar la cantidad de señal que llega hasta su salida, a mayor voltaje aplicado mayor cantidad de señal pasará. Cuando se alcanza el voltaje máximo la señal completa pasa inalterada de entrada a salida, es por este motivo que, aunque su nombre incluya el término “Amplificador” raramente amplifica la señal, sino que más bien la atenúa. Cabe recalcar que la función del VCA es de mero control y no debe añadir armónicos a la señal de entrada. [Shepard, B]

Aunque el único uso del VCA es atenuar una señal y controlar su paso, modulándolo con otra señal de entrada, se puede emplear para:

- Control de audio: atenúa una señal de audio, quedando subordinada a la entrada de modulación del VCA. Al trabajar con audio se suele aplicar la relación exponencial a la señal moduladora. Si en la *entrada de CV exponencial* se aplica una señal oscilante se obtiene un tipo de síntesis denominada AM (Modulación en Amplitud) que originará nuevos armónicos por la multiplicación de ambas señales, observables en la Figura 3.2, donde un tono sinusoidal (primera imagen) se modula por otro tono sinusoidal con distinta frecuencia (segunda imagen):

$$f \text{ fundamental} = f \text{ portadora}$$
$$f \text{ armónicos} = f \text{ portadora} \pm f \text{ moduladora}$$

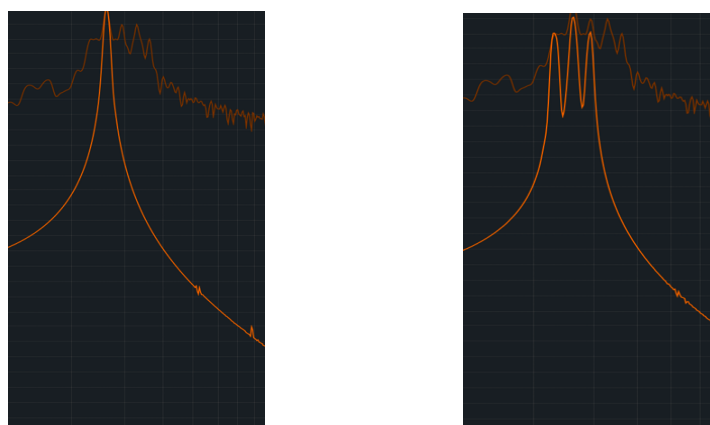
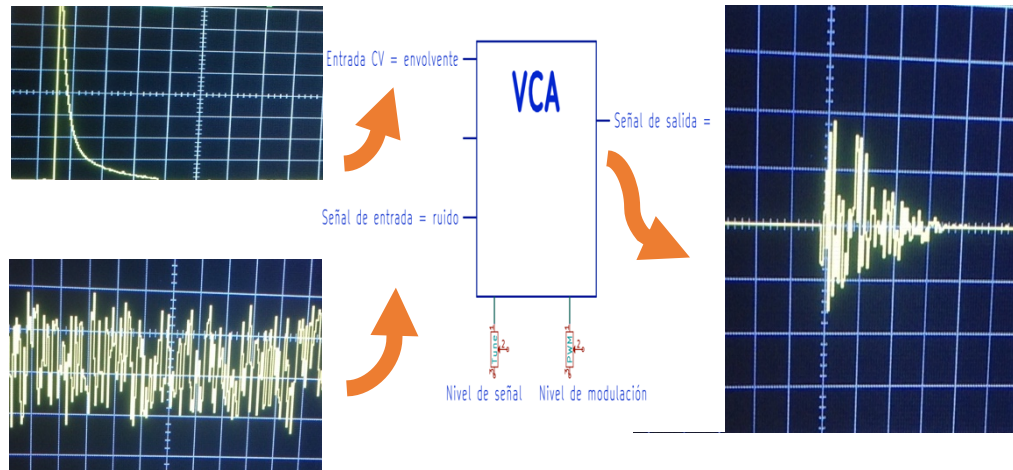


Figura 3.2. Modulación en amplitud

Por ejemplo, si hacemos pasar una señal de ruido por el VCA y controlamos su amplitud con una envolvente corta se obtiene un sonido similar al platillo de una batería. Este ejemplo se encuentra representado en el diagrama explicativo que se muestra a continuación.



- Control de CV: limita la amplitud de una señal de control de un primer módulo destinada a un parámetro de un segundo módulo externo, atenuando su efecto en el parámetro del segundo módulo. En la siguiente Figura se puede evidenciar como una señal sinusoidal controla la frecuencia de una señal rectangular y a su vez la amplitud de esta señal.

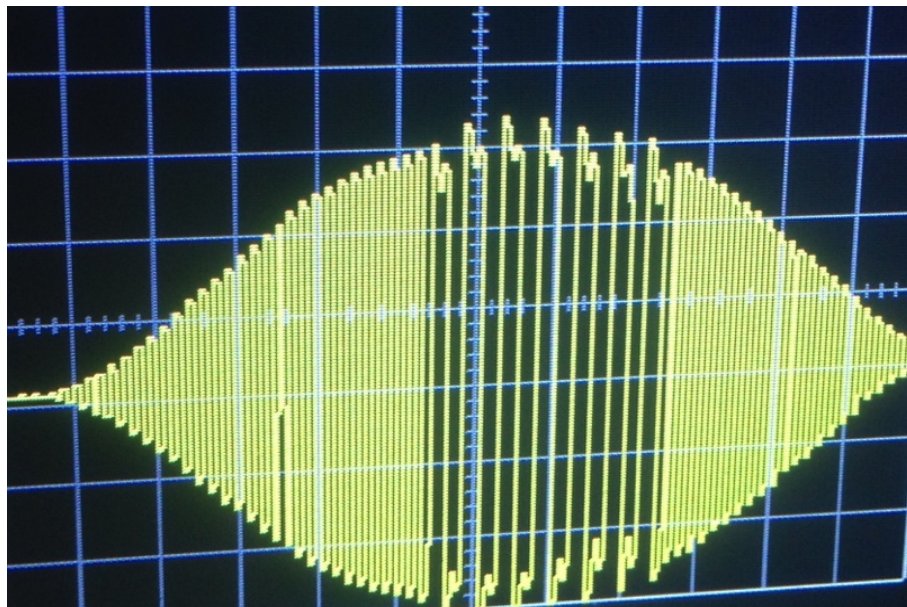
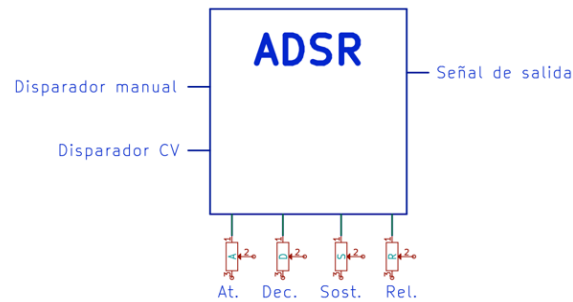


Figura 3.3. Señal cuadrada siendo modulada

3.3 Generador de Envolvente



El Generador de Envolvente también se conoce por las siglas en inglés de sus 4 periodos, ADSR (attack, decay, sustain, release). Una envolvente constituye la evolución temporal en amplitud de una señal y consiste en una forma lineal o exponencial que precisa de 4 parámetros para definirse, representados en la Figura 3.4:

- **Ataque.** Establece el tiempo que tarda la señal en crecer desde su punto inicial nulo a su punto máximo. En elementos de percusión o cuerda pulsada este tiempo es casi nulo y el volumen máximo se alcanza al momento del impacto, pero en otros instrumentos como los de viento o cuerda frotada, este periodo puede ser modificable y se conoce como *crescendo* [Puckette, M].
- **Decaimiento.** Define el tiempo que tarda la señal en decrecer desde su punto máximo hasta el nivel de Sostenimiento.
- **Sostenimiento.** Amplitud que perdura tras el Decaimiento. En un piano, por ejemplo, un pedal permite mantener una cuerda vibrando e impedir que el piano deje de sonar mientras no se levante.
- **Relajación.** Controla el periodo de tiempo desde que la nota ha dejado de ser pulsada hasta que deja de escucharse. Definirá el tiempo necesario para que la amplitud fijada en la etapa de Sostenimiento se reduzca hasta cero.

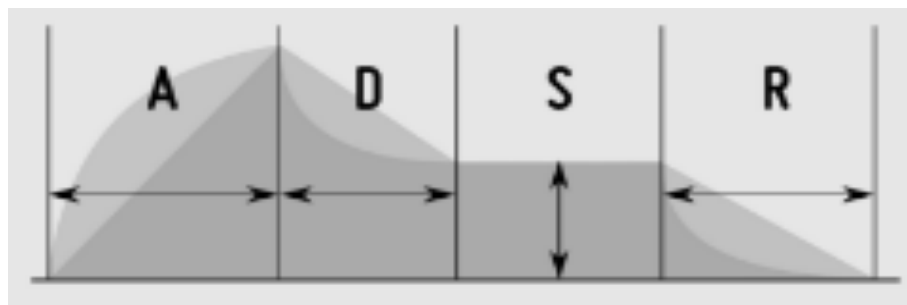


Figura 3.4. Etapas de una envolvente

La mayoría de generadores de envolvente permite cambiar el comportamiento del circuito de dos maneras:

- Pasar de un crecimiento de la señal lineal a una exponencial. En la Figura 3.5 se puede comprobar la diferencia en el contorno de una envolvente exponencial y una lineal.

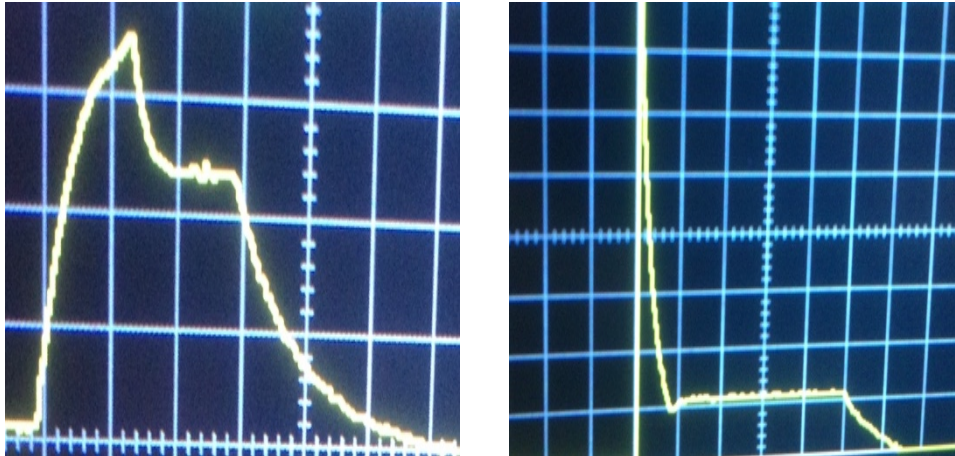


Figura 3.5. Distintos comportamientos de la misma envolvente

- Seleccionar el rango de tiempo, permite intercambiar entre dos configuraciones de envolvente, lenta y rápida.

Este módulo precisa de una señal de entrada que le indique cuando comenzar y cuando terminar. Esta señal se define como **Gate** (disparador). Generalmente estará comunicada con la salida Gate de un teclado, de tal manera que al pulsar las teclas se irán generando las envolventes. Para un mayor control se suele incorporar un botón que activará la entrada Gate de manera manual. También se puede generar una señal Gate desde un dispositivo MIDI, aunque esta necesitará de un conversor digital/analógico [Mitchell, D]. Cuando el ADSR recibe un pulso alto en su entrada de disparo ejecuta las etapas de Ataque y Decaimiento, y si, tras este periodo, el pulso permanece en alto, mantiene la amplitud configurada en el Sostenimiento. Una vez que el pulso cae a 0 se ejecuta el periodo de Relajación hasta que la señal caiga a 0.

En la Figura 3.6 se muestran una serie de pulsos de entrada disparados desde un teclado y las correspondientes envolventes que generan, nótese que si durante alguno de estos periodos se recibe otro pulso de entrada el ADSR interrumpe el ciclo que estuviese realizando y vuelve a comenzar, como se puede comprobar en la segunda envolvente de la figura, donde su periodo de Relajación no llega a concluir.

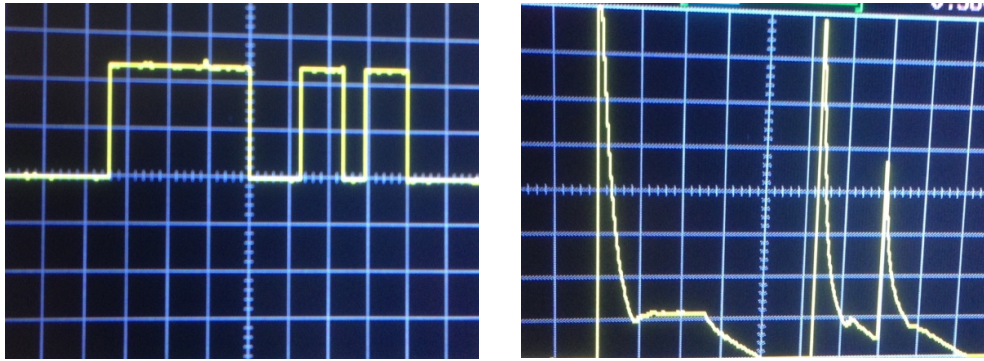
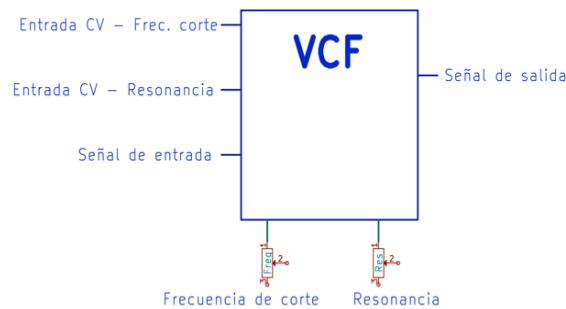


Figura 3.6. Pulsos disparando envolventes

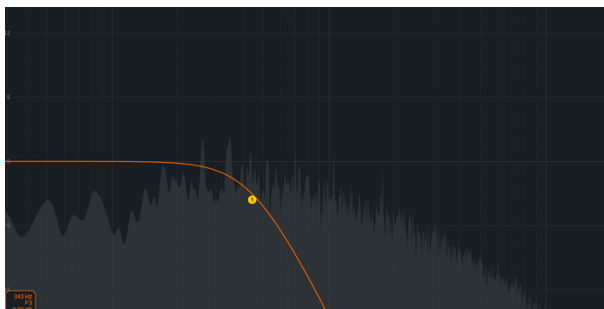
Este módulo es extremadamente versátil e introduce el control temporal en el sistema al permitir que el nivel de modulación aplicado a un sonido no sea estático, sino que se desarrolle a lo largo del tiempo. Algunos generadores de envolventes más avanzados incorporan la función de Retrigger (volver a dispararse), de esta manera al terminar una envolvente se ejecuta un pequeño pulso interno que vuelve a dispararla, dando lugar a una señal cíclica con la forma definida por el usuario; con una envolvente lo suficientemente rápida se podría obtener un ciclo que entraría dentro del rango audible, obteniendo formas de onda extremadamente complejas.

3.4 Filtro multi-modo Controlado por Voltaje

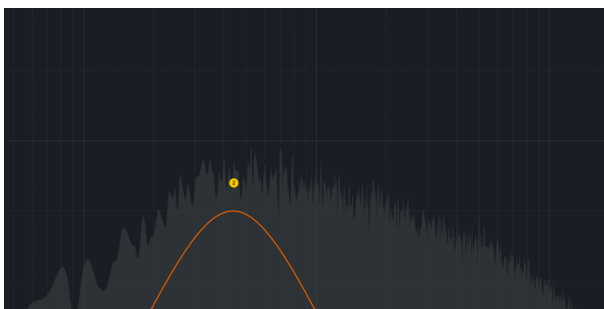


El VCF (Filtro Controlado por Voltaje) es el elemento encargado de bloquear ciertos armónicos y permitir el paso de otros, a voluntad del artista, y constituye el componente fundamental de la técnica substractiva, perfilando cualquier tono que pase a través de él [Ellis, M].

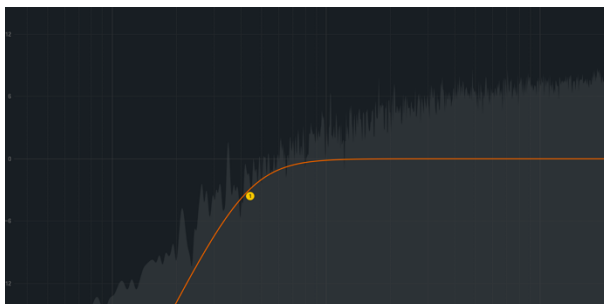
En función de las frecuencias que se quieran dejar inalteradas aparecen distintos tipos de filtrado, y los sintetizadores pueden presentar uno o varios tipos:



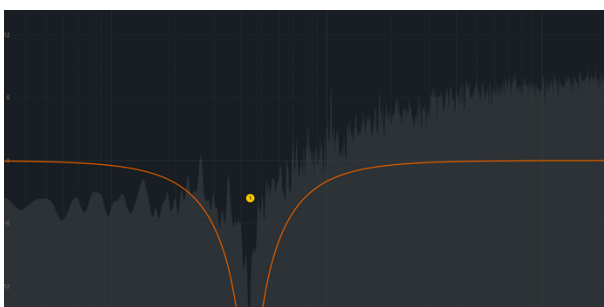
- Paso-Bajo: permite el paso de frecuencias situadas por debajo de una frecuencia de corte. Las frecuencias que se encuentren por encima del corte se verán bloqueadas.



- Paso-Banda: las frecuencias situadas en torno a la frecuencia de corte pasarán sin ser modificadas, atenuando todas las frecuencias que se sitúen por encima o por debajo. Surge de la combinación de un paso-bajo y paso-alto.



- **Paso-Alto:** cualquier frecuencia situada por encima de una frecuencia de corte pasará sin ser atenuada. Es el comportamiento inverso a un filtro paso-bajo.



- **Notch:** bloquea exclusivamente las frecuencias situadas en torno a una frecuencia de corte. Todas las demás frecuencias no se ven modificadas. Es útil cuando se quiere atenuar una frecuencia en particular.

Tabla 3.2. Tipos de filtro

Un filtro presenta tres parámetros que definen el tipo de corte que se realiza en el sonido:

- **Frecuencia de corte.** En la tabla anterior correspondiente a los tipos de filtrado la frecuencia de corte es común a todos e igual a 458 Hz, este punto puede ser ajustado mediante un potenciómetro o gracias a CV. La frecuencia de corte de un filtro se establece teóricamente como aquella frecuencia que presenta una atenuación de la señal original en 3 dB y desde la cual el filtro comienza a actuar.
- **Pendiente.** Es la velocidad de atenuación de las frecuencias. Se especifica en dB/octava e indica cuantos decibelios menos presentará la señal en cada octava. Se clasifican según sus polos u orden. Cada polo corresponde a 6 dB/oct, y a mayor dB/oct, más brusco será el corte. Quizá la pendiente más famosa sea la de 24dB/oct presente en los sintetizadores Moog, pero también es habitual encontrar filtros multi-modo con pendientes seleccionables de dos, tres y cuatro polos.
- **Resonancia.** Control que potencia las frecuencias alrededor de la frecuencia de corte. Si el nivel de resonancia es muy alto el filtro puede empezar a oscilar por sí mismo y se comporta como un generador de tono sinusoidal, apreciable en la Figura 3.7.

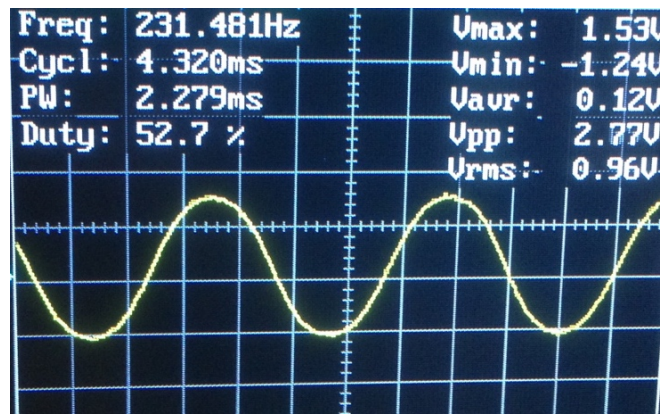


Figura 3.7. Filtro auto-oscilando

Midiendo la señal de salida de un filtro situado en 230 Hz y con su resonancia amplificada al máximo, se obtiene un tono sinusoidal sin la necesidad de una señal de entrada (Figura 3.7).

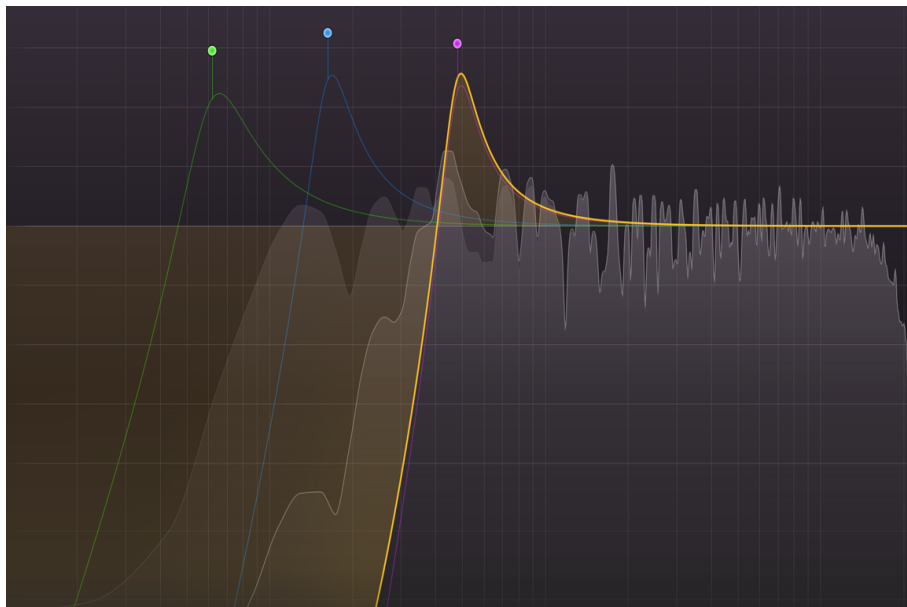
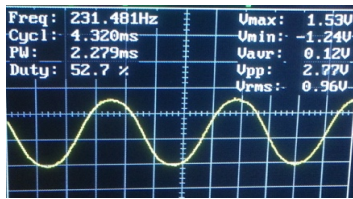
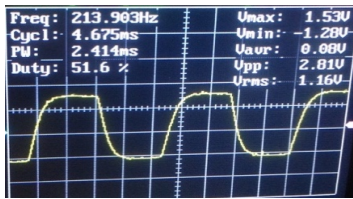
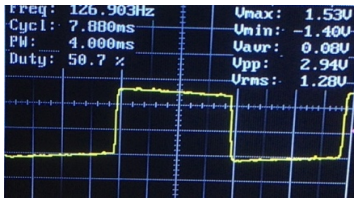


Figura 3.8. Tres filtros paso-bajo con distintas pendientes

En la Figura 3.8 se han generado tres filtros paso-bajo, cada uno con una pendiente de 12, 18 y 24 dB, filtrando distintas frecuencias y aumentando la resonancia.

El efecto de la desaparición de armónicos se refleja en las formas de onda, que quedan redondeadas, aproximándose hacia el tono puro, la onda sinusoidal.



Disminuye la frecuencia de corte →

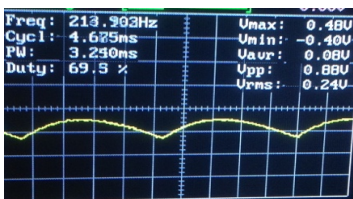
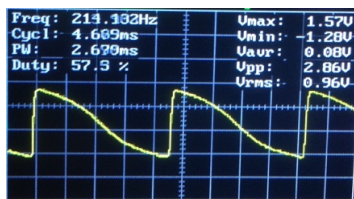


Tabla 3.3. Filtrado de señal

3.5 Generador de Ruido

El generador de ruido presenta un comportamiento relativamente simple, su única función es la generación de una señal eléctrica aleatoria conocida como ruido y que suena como una distorsión, se asemejaría al viento soplando en un micrófono.

Aun así no todos los ruidos que se pueden producir son iguales. Se distinguirá entre ellos en función de la energía concentrada en las distintas partes del espectro auditivo [Liu,S].

- **Ruido blanco.** Presenta la misma energía en todo el espectro auditivo. Si relacionamos el nivel de energía con las bandas de octava aparecerá una gráfica creciente (Figura 3.9). En la banda de octava de 400 Hz a 800 Hz habrá menos energía que en la de 800 Hz a 1600 Hz y así progresivamente según subamos en frecuencia.

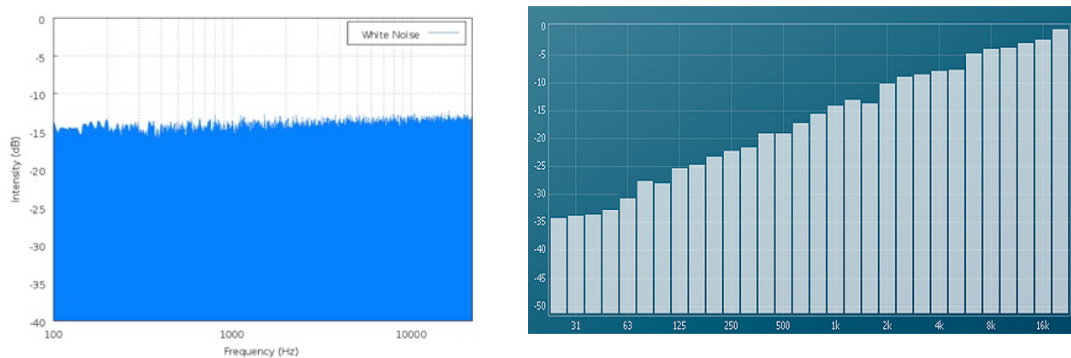


Figura 3.9. Ruido blanco, respuesta frecuencia y energía por bandas de octava

- **Ruido rosa.** La relación de energía por octava permanece constante (Figura 3.10). Traducido al espectro auditivo se comprueba que la amplitud del ruido decae si aumenta la frecuencia, esta caracterizado por una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia. Tiene una atenuación de 3 dB/oct.

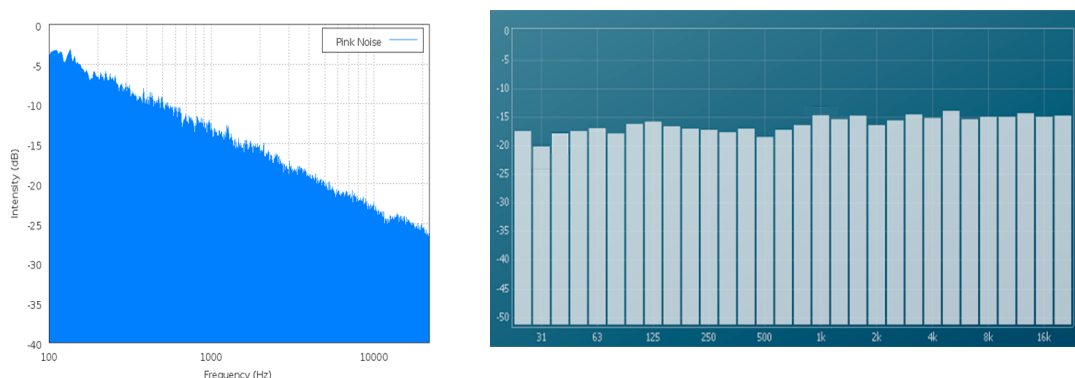
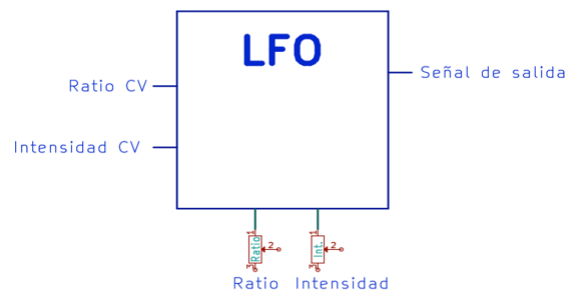


Figura 3.10. Ruido rosa, respuesta frecuencia y energía por bandas de octava

3.6 Oscilador de Baja Frecuencia



El oscilador de baja frecuencia, o conocido por sus siglas en inglés (Low Frequency Oscillator), presenta el mismo comportamiento que un VCO, pero la diferencia radica en la frecuencia de las oscilaciones. Las señales de salida que ejecuta este módulo se encuentran fuera del rango audible, concretamente por debajo, generando oscilaciones mucho más lentas.

Las características esenciales de este módulo son las siguientes:

- **Selector de Ratio.** Establece la frecuencia de oscilación de la señal de salida.
- **Selector de Intensidad.** Define la amplitud de la señal resultante.
- **Señal de salida.** Al igual que sucede con el VCO este módulo presenta distintas formas de onda: cuadrada, diente de sierra, triangular, senoidal, etc.
- **Entradas CV.** Permite la modulación de su frecuencia y su intensidad por parte de señales externas.

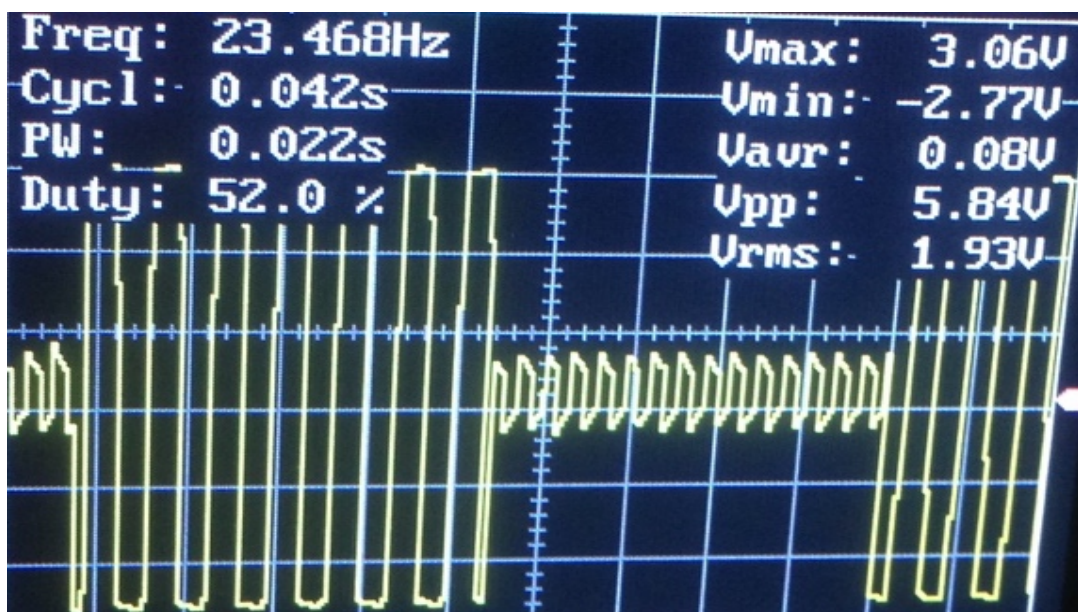
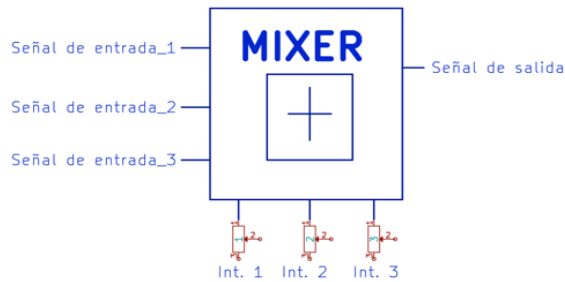


Figura 3.11. Modulación producida por un LFO

3.7 Mezclador de Señal



Mezclar distintos sonidos modulados otorga gran riqueza armónica al resultado final. Este es el módulo más simple de diseñar y de entender de todos los presentes [Self, D].

Presenta entre 2 y 6 canales, cada uno con su control individual de volumen, asimismo se establece una jerarquía entre los sonidos que tendrán más presencia y los que se situarán en un segundo plano. Como sucedía con el VCA la función del mezclador es nivelar las señales de entrada y sumarlas pero en ningún caso debe “colorear” o hacer ninguna aportación armónica, una señal aplicada en solitario y sin limitación de volumen debe mantener los mismos armónicos a la entrada y a la salida.

Una aplicación un tanto más compleja de un mezclador de audio es la de una mesa de mezclas (Figura 3.12). Su imagen ha sido la más difundida, en parte por el fenómeno DJ, pero también por ser el icono más emblemático de cualquier estudio de mezcla profesional. Permite la mezcla del volumen general de la pista de audio, e incorpora un ecualizador que realza las frecuencias que se deseen, distinguiendo entre agudos, medios y graves. Con un ecualizador paramétrico se puede seleccionar la frecuencia precisa que se desee y posteriormente realzarla o atenuarla.

Estos complejos aparatos también tienen cabida en el mundo del sintetizador y un buen artista deberá incorporarlos a su sistema modular para controlar a la perfección los niveles de volumen y frecuencia de cada uno de sus sonidos. Algunos de los mezcladores en formato módulo más avanzados, permiten el paneo de la señal, diferenciando entre monitor de escucha izquierdo y derecho, y direccionando los sonidos para su escucha exclusiva en un altavoz o en otro.



Figura 3.12. Mesa de mezclas

3.8 Módulo de Salida

El Modulo de Salida (Output en inglés) elimina la componente continua del sonido y regula la impedancia de salida para permitir su conexión a equipos de escucha o grabación.

Suelen incorporar un distribuidor que simplemente replica la señal entrante y la distribuye en otros canales adicionales. En el caso de un sistema modular esta aplicación es muy útil para conseguir que una misma señal pueda ser aplicada en distintos puntos del instrumento (Figura 3.13).

Pueden incluir un adaptador de tensión, un replicador de una conexión Minijack a otra Jack o Banana (Figura 3.14).

Distinguen entre canal izquierdo (L) y derecho (R) otorgando así la capacidad estéreo, tan necesaria para darle realismo y espacio a la mezcla.



Figura 3.13. Distribuidor o splitter Figura 3.14. Output. Incluye adaptador de minijack a Jack

Capítulo 4.- Diseño propuesto y construcción

En este Capítulo se expone de manera esquemática los condicionantes que justifican la propuesta de un nuevo diseño de sintetizador, centrándose en el conexionado lateral de sus módulos. Se detallan las características que deberá presentar la carcasa en la que se alojan los circuitos con el fin de simplificar el uso general del instrumento, así como el acabado estético que se busca, para hacer el producto atractivo ante el consumidor final; para ello se referencian diseños similares a los buscados, que actualmente existen en el mercado. Una vez definido el producto se planteará una cadena productiva para el ensamblaje de los componentes y el empaquetado del producto terminado.

4.1 Justificación y condicionantes

Se quiere introducir en el mercado un nuevo diseño de sintetizador por los siguientes motivos:

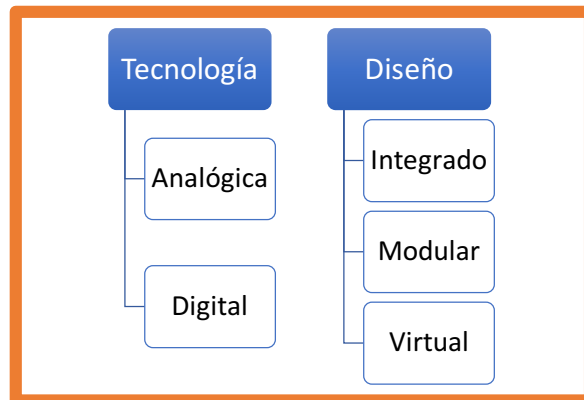
- Es necesaria una simplificación en el conexionado de un sistema modular complejo, ya que este no ha cambiado desde que se creó el primer sistema en los 70, pero sin renunciar a la tecnología que implementa y a la interactividad que ofrece.
- Actualmente emerge un crecimiento exponencial del mercado orientado a aficionados y profesionales de la música electrónica, debido a la atención mediática que recibe y el avance de la tecnología.

4.2 Concepto creativo

- Nuevo formato de sintetizador analógico, intuitivo y simple de conectar, reúne la comodidad de un integrado en carcasa junto con expansión modular. Se deberá evitar el uso de elementos de interconexión ajenos al propio sistema, como cables.
- Filosofía minimalista y orientada al músico, simplificando la creación de su sonido pasando primero por la creación de su instrumento.

La tecnología aplicada al diseño debe cumplir los siguientes requisitos, inicialmente:

1. Que sea analógico:
 - El usuario debe poder expresarse infundiendo movimiento a los parámetros con sus propias manos
 - No requiere de un ordenador para hacerlo funcionar
2. Que sea modular:
 - Expandible
 - Direccionamiento libre de las señales



Los módulos deben tener las siguientes características diferenciadoras:

- **Transportables.** Actualmente los módulos son componentes muy frágiles, suelen llevar los circuitos expuestos ya que van atornillados a una caja, donde se agrupan todos. El sistema a desarrollar debe poder asegurar el transporte seguro de los módulos, como por ejemplo al ser llevados en una mochila.

- **Intuitivos.** Las funciones de cada módulo deben de estar situadas en un lugar estratégico del panel frontal, con el fin de simplificar su manipulación. Las entradas y salidas deben diferenciarse cómodamente.
- **Pensado para tocar.** Al ser un instrumento musical, su manejo y control debe de ser lo más preciso y cómodo posible, incidiendo en el rotulado de los nombres de los parámetros y en el tacto y tamaño de los potenciómetros de control.
- **Funcionalidades básicas.** En primera instancia se diseñarán y prototiparán los 8 módulos analógicos presentados en el Capítulo 3, ya que estos reúnen las características primigenias de un sintetizador completo, siendo estas: Oscilador Controlado por Voltaje, Amplificador Controlado por Voltaje, Generador de Envolvente, Oscilador de Baja Frecuencia Controlado Por Voltaje, Generador de Ruido, Mezclador de señal, Filtro Controlado por Voltaje de tipo *Steiner* y Módulo de Salida.
- **Conexión lateral.** Se elimina la necesidad de conexión por cable, liberando el frontal para su manipulación y se simplifica el direccionamiento de señal.
- **Alimentación del sistema.** Para que el sistema funcione necesita de un módulo de alimentación que suministra la potencia para todo el sistema. El conexionado lateral implementado suministra la corriente a los nuevos módulos conectados. También permite que un módulo que no se esté utilizando no consuma potencia.

4.3 Estructura propuesta

- Compuesto por una carcasa robusta, ligera y manejable.
- Panel frontal grande, cómodo de leer.
- Placas de circuito impreso adaptadas al sistema.
- Montaje del sistema rápido y sencillo.
- Sistema resistente y duradero

4.4 Justificación de su forma

- **Tamaño.** Debe facilitar la lectura de los parámetros y la incorporación de potenciómetros grandes, pero sin prescindir de la simplicidad de manejo y conexionado, así como de su portabilidad, por tanto, el frontal debe medir 80 x 80 mm . Tras un análisis exhaustivo de productos orientados al mismo mercado se ha llegado a la conclusión de que la altura debe ser de 30 mm, ya que esta altura elevaría el sistema a la misma que otros productos.
- **Materiales.** La carcasa se diseñará y planteará para ser construida en madera mediante la técnica de corte láser. Esta técnica permite cortar cada una de las caras laterales así como grabar cualquier icono o término sin necesidad de pintura. Se empleará madera DM, barata y fácil de conseguir. Lo componentes electrónicos utilizados serán genéricos, lo que reduce su coste y dificultad de compra.
- **Acabados.** Para mayor ergonomía, las esquinas serán redondeadas y el conexionado entre módulos será imantado. Cada una de las entradas, salidas y parámetros contará con un rótulo indicativo, empleando una tipografía acorde a la filosofía del producto, así como de embellecedores en los potenciómetros. Para el acabado superficial de la madera se opta por chapar los tableros con madera Okola.
- **Electrónica.** Las placas de circuito impreso serán diseñadas para ser alojadas cómodamente en la carcasa y contarán con serigrafías y numeraciones para facilitar su ensamblado.

4.5 Formalización de la producción

En el caso de comenzar una producción a pequeña escala de este producto se necesitarán las siguientes herramientas:

- Fresadora CNC
- Máquina de corte láser
- Soldador

La cadena productiva para fabricar y ensamblar cada uno de los módulos será:

- 1) **Abastecimiento de componentes.** Se adquieren: componentes electrónicos, placas de cobre y los materiales de la carcasa.
- 2) **Producción de placas.** Con la ayuda de una fresadora CNC se trazan las pistas de cobre en las placas, así como los taladros pasantes.

- 3) **Construcción de carcasas por corte láser.** Tanto el corte de la madera como el fresado de las placas pueden suceder al mismo tiempo.
- 4) **Soldado de los componentes.** Una vez soldados los componentes se deberá testear individualmente cada placa para comprobar si tiene el comportamiento esperado.
- 5) **Ensamblaje de carcasas.** Al igual que en la fabricación, el ensamblaje de las carcasas puede suceder a la vez que el soldado de los componentes.
- 6) **Acabados.** Unir placas y carcasa y colocar los embellecedores.
- 7) **Empaquetado.**

Si la producción tuviera que ser mayor de la abarcable por una cadena manual se contaría con las siguientes soluciones:

- 1) Fabricación, testeo y ensamblado de cada una de las placas a cargo de una empresa especializada.
- 2) Incorporación de carcasas diseñadas con nuevos materiales que simplifiquen su producción a gran escala.

4.6 Referentes del nuevo diseño

Actualmente existen en el mercado ciertos productos que se han alejado de los cables para su conexionado. Gracias a cada una de sus propuestas se puede obtener un diseño final ajustado a las necesidades presentes y con atractivo comercial:

1. LittleBits

El sistema LittleBits (Figura 4.1) fue ideado para el prototipado de aparatos electrónicos sin necesidad de protoboard. Encaminado hacia niños, cada módulo incluía una serie de componentes electrónicos, fácilmente interconectable mediante imanes, situados en sus laterales. Los módulos podían incluir sensores, potenciómetros y componentes pasivos.

Posteriormente aliándose con la marca de sintetizadores Korg, se lanzó al mercado un sencillo sintetizador que seguía la misma filosofía que sus módulos para prototipado. Cada módulo presenta una funcionalidad básica de síntesis y mediante su conexión podían generar sonido.

El principal problema de este sistema era su excesiva sencillez. Al agrupar todos sus componentes en una pequeña lámina se perdía calidad, las modulaciones entre

componentes eran prácticamente inexistentes y su manejo es extremadamente complicado. Por tanto, los módulos y sus funcionalidades aparecen reducidas y, al precisar de constante manejo por parte del artista es, cuanto menos, engorroso y estresante.

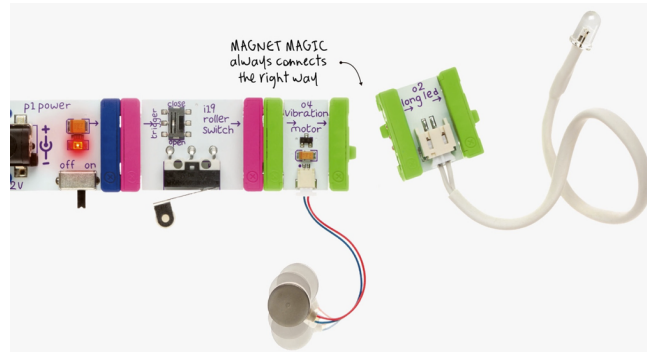


Figura 4.1. Distintos módulos compactos Little Bits

2. AudioCubes

La tecnología desarrollada por AudioCubes lleva perfilándose desde la primera generación de su producto en 2007. En 2017 lanzan al mercado su último sistema Synthor System 8 que puede programar y controlar a distancia los cubos.

La conexión entre sus cubos se realiza mediante sensores inalámbricos, que poseen un ángulo de visión de 30°. Apoyados en la tecnología inalámbrica, los módulos no incorporan ningún potenciómetro, y por tanto la modulación dependerá de la distancia de los cubos entre sí y del ángulo en el que se sitúen.

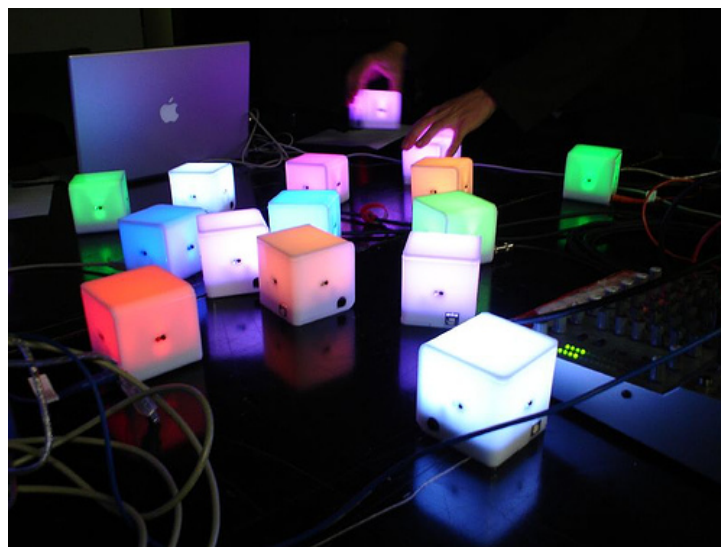


Figura 4.2. Audio Cubes

Los módulos son genéricos, es decir, por si solos no realizan ninguna función y deben ser programados previamente a su uso, precisando de un ordenador. Una vez que un módulo se ha programado o enlazado muestra un color característico acorde a la función que desempeña, facilitando su identificación, aun así, los cubos sólo presentan este identificativo y su acabado no es estético. Utilizan una batería recargable como fuente de alimentación.

Aunque pueda ser empleado como tal este sistema no es un sintetizador, sino más bien una herramienta de control basada en cubos enlazables, que pueden ser parametrizables a muchos otros programas alejados del audio.

3. PatchBlocks

Los sintetizadores digitales como PatchBlocks precisan de un programa de ordenador que diseñe y cargue las funcionalidades en los módulos. Al ser diseños generalistas no tienen controles dedicados para cada uno de los módulos. Se enlazan de manera lineal y su acabado no es robusto. Se alimentan a través de una batería incorporada. Incorporan entradas y salidas mini-Jack, lo que permite al sistema comunicarse con otro equipamiento de estudio, como un sintetizador modular clásico.



Figura 4.3. Patchblocks

MARCA	TAMAÑO	Conexionado	Tecnología	Alimentación
LittleBits	X	Directo	Analógico	Fuente
AudioCubes	✓	Inalámbrico	Digital	Batería
PatchBlocks	✓	Directo	Digital	Batería

Tabla 4.1. Referencias de diseño

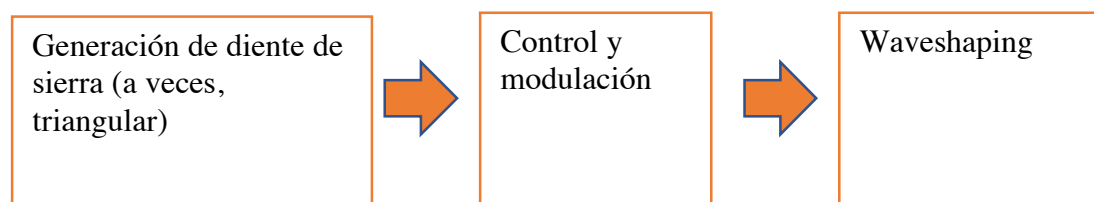
Capítulo 5.- Arquitectura del diseño propuesto

5.1 Circuito del Oscilador Controlado por Voltaje

El circuito que compone el VCO debe ser capaz de realizar las siguientes funciones:

- Generación de distintas formas de onda
- Control sobre la frecuencia de oscilación
- Control de afinación, para ajustes más precisos
- Entrada de modulación de frecuencia
- Entrada de sincronía

Todos los diseños de osciladores controlados por tensión parten de una estructura idéntica:



1. Generación

La generación de una onda de sierra se basa en el comportamiento eléctrico de un condensador (C6) siendo cargado. El voltaje entre terminales de un condensador es dependiente de la intensidad que circula por el circuito, del tiempo y de la capacidad de dicho condensador, como demuestra la ecuación siguiente:

$$i(t) = C * \frac{dV}{dt}$$

Controlando la intensidad que entra en el circuito de generación de sierra, el condensador se carga linealmente y, al alcanzar cierto valor umbral (*threshold*, en inglés) en un circuito comparador, se dispara un pulso que rápidamente descarga el condensador y reinicia el ciclo de nuevo (Figura 5.1).

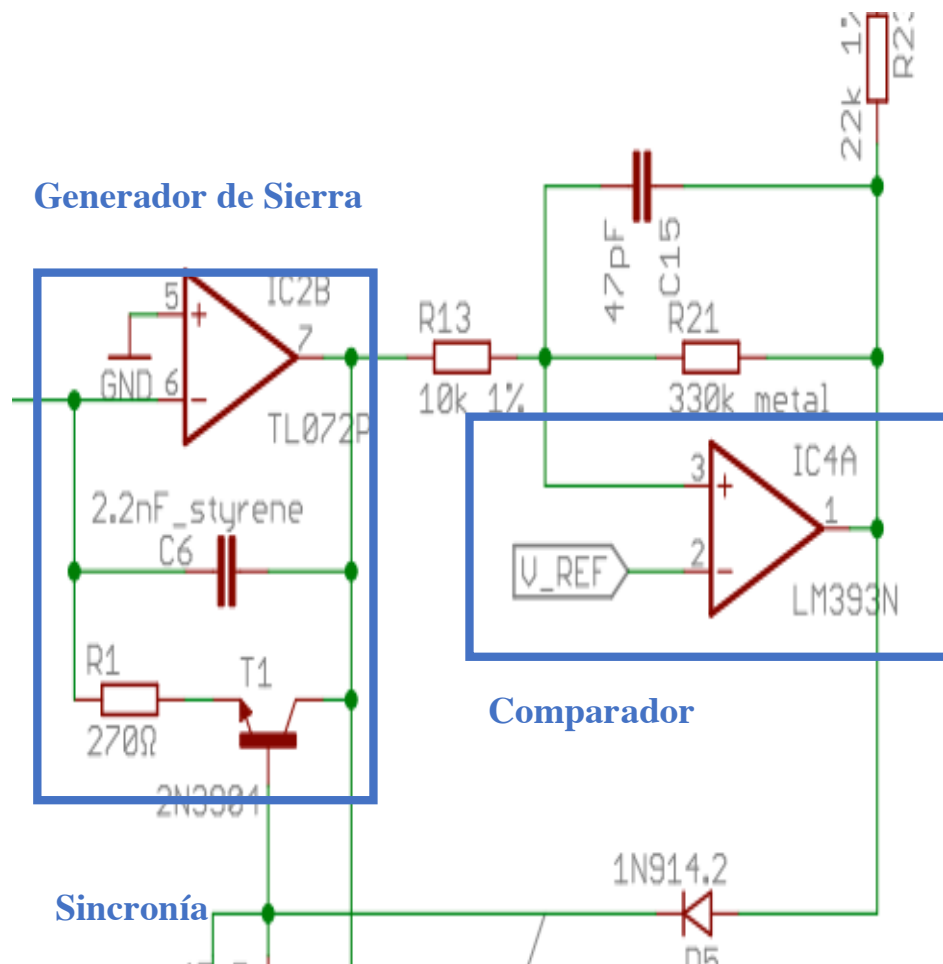


Figura 5.1. Detalle circuito VCO

El elemento encargado de descargar el condensador es un transistor 'T1', cuya base está siendo controlada por un amplificador operacional actuando como comparador 'IC4A'. Como el transistor es el elemento encargado de reiniciar el ciclo se habilitará una entrada de sincronía directamente en la base de dicho transistor, de tal forma que ponga a cero la señal generada si la entrada de sincronía alcanza el cero.

El comparador ejecuta un pulso alto si el voltaje en su entrada positiva es mayor que el voltaje de referencia en la entrada negativa; si, por el contrario, el voltaje en el pin negativo es superior, el comparador establece un pulso bajo. En un momento de la carga lineal del condensador el voltaje en el pin 3 del comparador supera al establecido en el pin 2 y el comparador cambia su estado a un pulso alto. En ese momento excita la puerta del transistor y el voltaje cae a 0. Este es un proceso cíclico, el voltaje de la entrada negativa vuelve a ser mayor que el de la entrada positiva y el comparador vuelve a ejecutar un pulso bajo.

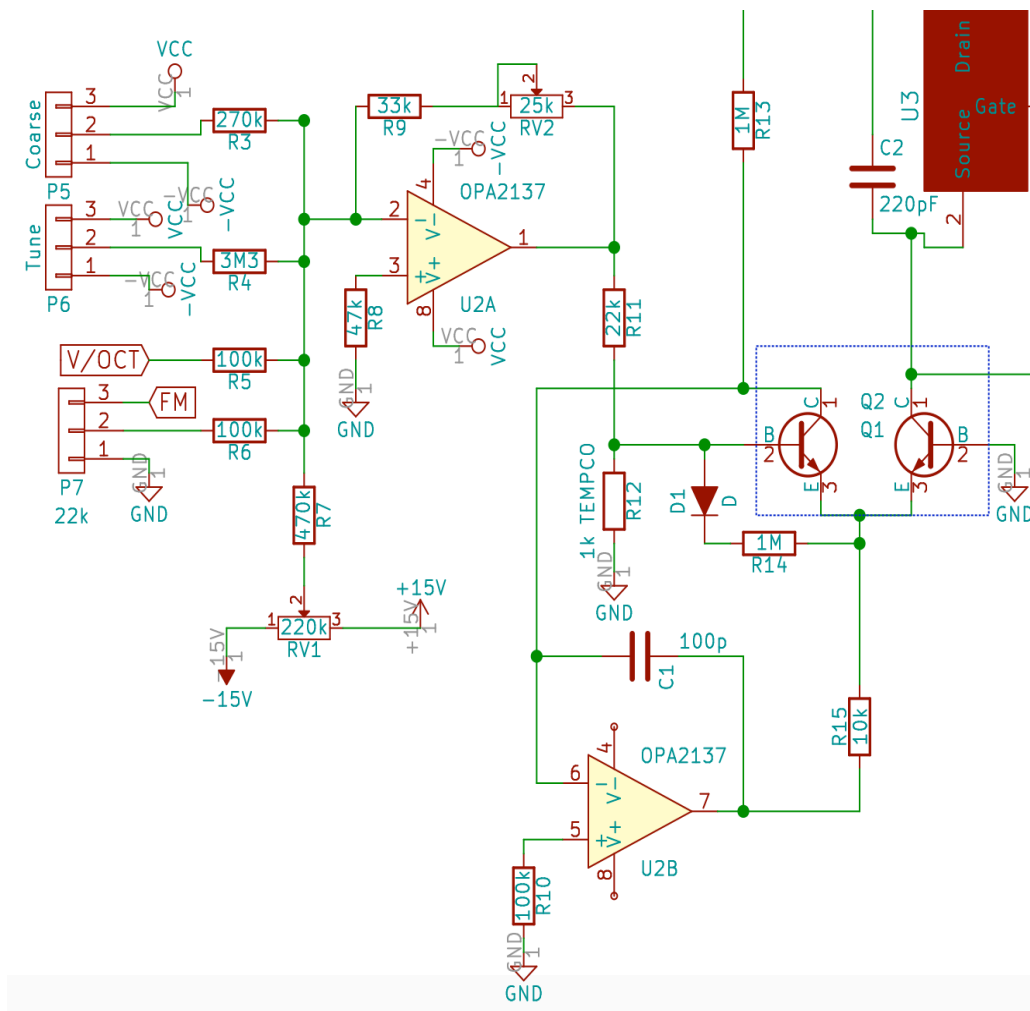


Figura 5.2. Control del VCO

2. Control y modulación

La velocidad de carga del condensador depende proporcionalmente de la corriente suministrada, y es por esta propiedad por la cual la frecuencia de oscilación puede ser modificada. En la Figura 5.2 se detalla el control de la corriente que alimenta al circuito, compuesto por:

- **Un amplificador operacional OPA2137.** Actúa como sumador de todas las tensiones externas que afectan al circuito, es decir, los potenciómetros que permiten un ajuste manual de la frecuencia (Freq, Afinación y FM). La entrada de afinación contará con un valor de resistencia de entrada superior al resto, para un control más preciso.
- **Dos transistores.** Para el control y la modulación de la frecuencia se empleará una pareja de transistores en disposición de par diferencial. La tensión resultante del par diferencial será proporcional a la corriente suministrada en la base del transistor, que proviene del circuito sumador.
- **Un circuito regulador.** Los transistores son un elemento cuyo comportamiento se ve afectado por la temperatura, por tanto se incluye una resistencia dependiente de la temperatura de 1k, también llamada termistor, que compensará el efecto de la temperatura en el circuito.

Establecer una relación proporcional y estable entre la tensión suministrada y la frecuencia de oscilación es la tarea más dura del diseño de un VCO. Cada valor de cada resistencia debe estar calculado de manera precisa, pero sin duda, el comportamiento más inestable es el que presentan los transistores. Estos dispositivos varían su comportamiento con la temperatura del entorno, y es por esta razón que los instrumentos musicales basados en transistores deben estabilizar su comportamiento en los minutos iniciales tras su encendido.

3. Waveshaping

El oscilador controlado por tensión alcanza una mayor versatilidad si es capaz de generar más de un tipo de forma de onda, ya que cada una de ellas presenta unos armónicos característicos y diferenciados.

La técnica de waveshaping se encarga de perfilar y modificar la señal original para alcanzar otras formas de onda diferentes. En el módulo desarrollado sólo se incluirán dos formas de onda de salida: diente de sierra y rectangular, con control de PWM.

La onda de sierra no necesita ningún tratamiento de perfilado, por tanto, saldrá sin ser modificada, aunque se pasará por un amplificador operacional de ganancia unitaria para estabilizar su comportamiento.



Figura 5.3. Salida diente de sierra

Para alcanzar una forma de onda rectangular se debe introducir la onda de sierra en la entrada negativa de un amplificador operacional actuando como comparador. El comparador se encarga de generar un pulso alto o bajo en función de si la entrada positiva es mayor que la negativa o viceversa, y para modificar el ancho de pulso de la señal resultante se habilitará una entrada de PWM con un potenciómetro.

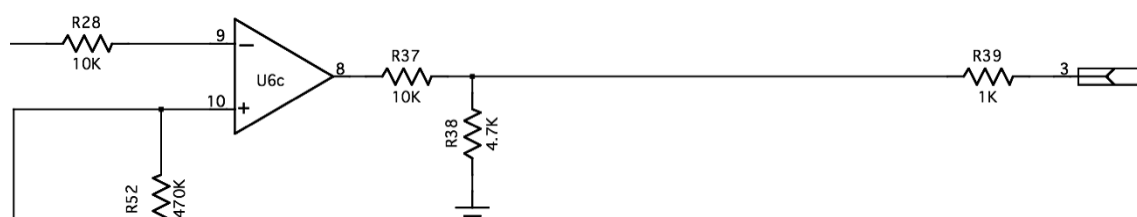


Figura 5.4. Salida PWM

La técnica de waveshaping permite alcanzar todas las formas de onda básicas (rampa, rectangular, sinusoidal, triangular) y otras muchas de mayor complejidad, pero no se profundizará más en ella en este trabajo.

5.2 Circuito del Amplificador Controlado por Voltaje

Para el control de la amplitud por parte de este módulo se tendrá en cuenta que:

- El módulo no efectuará aporte de armónicos alguno
- El control de la amplitud podrá ser configurable manualmente o con ayuda de una señal externa
- La cantidad de modulación externa podrá ser limitada
- Contará con un amplificador para potenciar las señales débiles de entrada

El control sobre la amplitud de una señal de audio recae sobre una pareja de transistores con la misma β (ganancia). Este sistema se conoce como amplificación diferencial [Schulz, D].

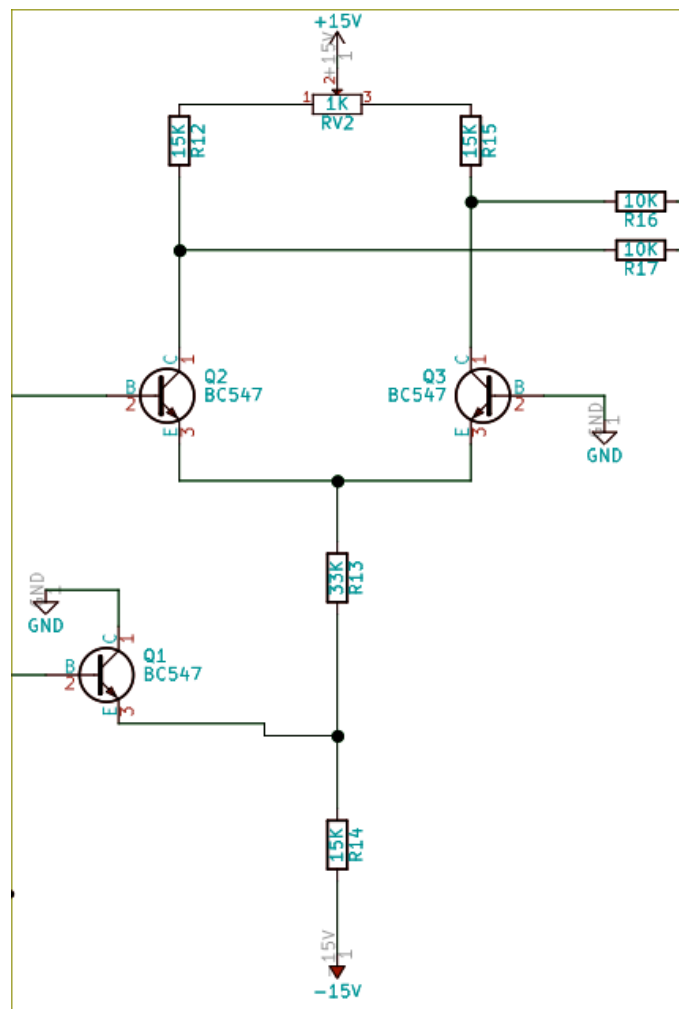


Figura 5.5. Detalle del par diferencial

Cuando una señal de audio aparece en la entrada no inversora sucede lo siguiente:

- Si la señal crece, la intensidad que circula por R12 aumenta a razón de:

$$I_c = I_b * \beta$$

- La caída de tensión en la resistencia es grande lo que provoca un V_{sal1} pequeño
- Cuando la señal decrece sucede exactamente lo contrario.
- Por la relación de intensidad que se debe mantener entre ambos transistores si la intensidad en 1 crece, decrecerá en 2 y viceversa.

Mediante esta disposición de emisor común, la corriente que circula por R13 y R14 se debe mantener constante y se establece gracias a un tercer transistor Q1. La amplificación de la señal de audio es proporcional al paso de corriente a través de Q1. Este diseño cuenta con dos trimmers (resistencia variable) para ajustar los niveles iniciales de ganancia y calibrar el VCA.

Para controlar la cantidad de modulación impuesta a nuestra señal se incorpora un potenciómetro, y también se añade otro más para la ganancia que se limitará a añadir tensión continua para amplificar la señal de entrada.

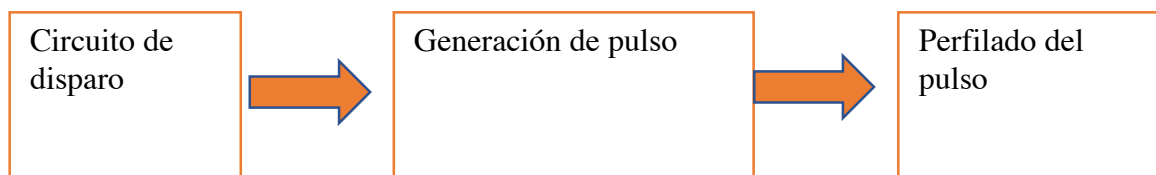
Por tanto, la importancia del amplificador operacional estriba en el hecho de que las salidas son proporcionales a la diferencia entre las dos señales de entrada. En este caso se amplificará una sola entrada conectando a masa la otra.

La configuración de amplificador operacional puede ser encontrada en circuitos integrados que incluyen transistores idénticos, es decir, que son exactamente simétricas ambas mitades del circuito. En este diseño se ha optado por emplear una pareja de transistores BC547C. Este transistor, a diferencia de sus hermanos de serie BC547B y BC547A otorga mayor capacidad de amplificación [Fairchild 1]. Conseguir que la pareja de transistores sea igual es imposible por lo que se sitúa un trimmer en la entrada común de colector de ambos para nivelar la corriente en cada rama.

5.3 Circuito del Generador de Envolvente

El generador de envolvente diseñado debe contar con las siguientes implementaciones:

- Circuito de disparo estable, pudiendo ser disparado por una señal externa o por un pulsador
- Generación de un pulso de duración ajustable
- Perfilado del pulso generado, contando con cuatro etapas: ataque, decaimiento, sostenimiento y relajación
- Las 4 etapas del pulso deben poder ser modificadas en su duración
- Salida de envolvente exclusivamente positiva o exclusivamente negativa
- Selector de velocidades $\times 1$, $\times 0.1$



1. Circuito de disparo

El circuito de disparo, Figura 5.6, se cimienta en una cadena de transistores que actúan como disparador Schmitt [Galvin, T]. Empleando la histéresis previene el ruido o las interferencias que la entrada pueda sufrir, este circuito permite establecer unos valores en torno a los cuales el comportamiento de la señal no varíe, es decir, ligeras variaciones de tensión en la entrada no provocarán variación alguna en el pulso de salida. Los valores umbral que modifican el comportamiento del disparador se calculan ajustando el valor de las resistencias.

Se habilitan dos entradas de disparo, la primera cuenta con un pulsador manual, que cierra un circuito de alimentación y dispara el primer transistor; mientras que la otra entrada (GATE) depende de una señal externa, que una vez aplicada, dispara el circuito.

El valor que tome el condensador influirá en el ancho del pulso de disparo, pero al no ser una situación crítica cualquier valor en torno a 10nF es suficiente.

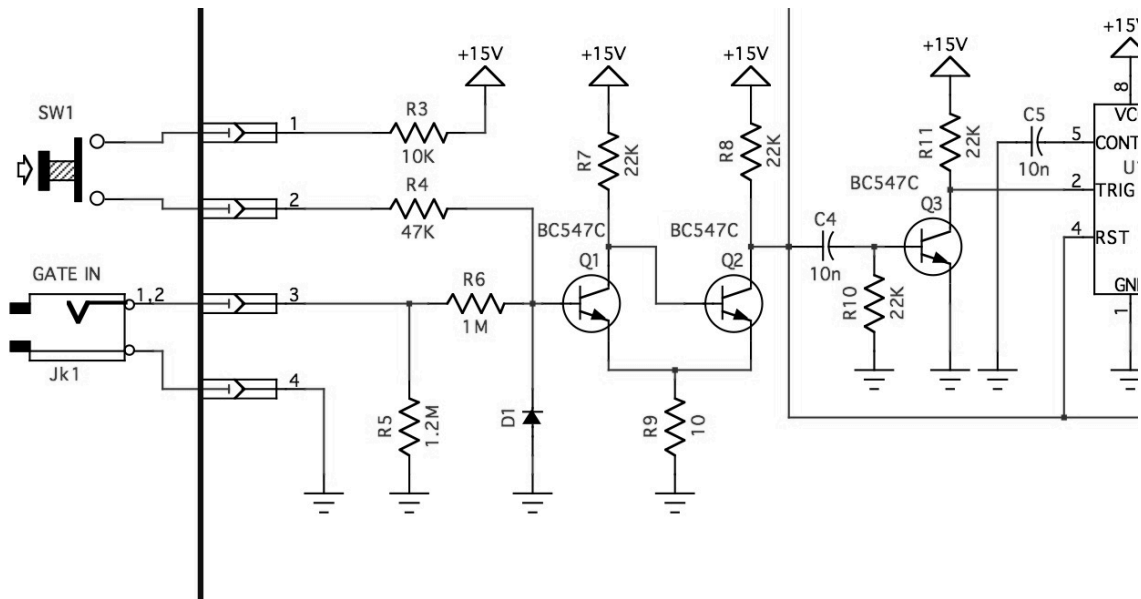


Figura 5.6. Circuito de disparo

2. Generación de pulso

Para la generación del pulso se empleará un temporizador 7555, versión mejorada y optimizada del integrado 555, empleado en miles de diseños en los que intervenga el control temporal. Este integrado presenta una serie de comparadores y resistencias internas que pueden conmutar rápidamente, dando lugar a señales pulsantes en su salida, que pueden ser utilizadas como señal de reloj (configuración astable) o como disparo de un único pulso de duración parametrizable (configuración monoestable). Esta última configuración será la apropiada para ejecutar un pulso de aproximadamente 10 V durante el tiempo definido por el usuario.

El integrado suele ofrecerse en encapsulado DIP de 8 pines, siendo sus nombres y funciones las siguientes:

1. **GND (masa).** Toma el valor de 0V si se conecta a tierra.
2. **TRIGGER (disparo).** Inicia la función de retardo en estado monoestable. El circuito de disparo configurado anteriormente se conectará a esta entrada.
3. **OUT (salida).** Presenta el resultado del temporizador, tomando el valor aproximado de VCC en su estado alto y de GND en su estado bajo.
4. **RESET.** Fuerza el valor de salida a permanecer en su estado bajo, ignorando las señales de disparo.

5. **CONTROL.** Es un punto de referencia. Se comunica con el divisor de tensión interno. En configuración astable se puede emplear para modular la frecuencia del tren de pulsos. Si no se utiliza, como es el caso, se suele conectar a tierra a través de un condensador para evitar ruidos.
6. **THRESHOLD (umbral).** Otra de las entradas a un comparador interno. Irá conectado a la salida de la envoltura para conocer así su estado e ir ejecutando las distintas etapas de perfilado.
7. **DISCHARGE (descarga).** Se emplea al descargar un condensador externo. Internamente se comunica con un transistor NPN, que pondrá a tierra este pin en el momento oportuno.
8. **VCC.** entrada de alimentación positiva.

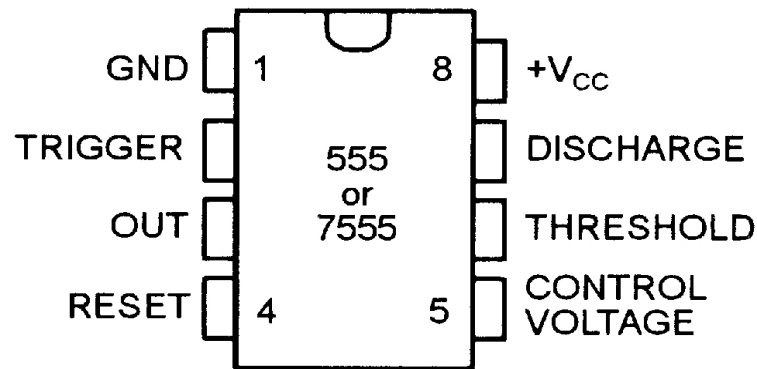


Figura 5.7. Temporizador 555

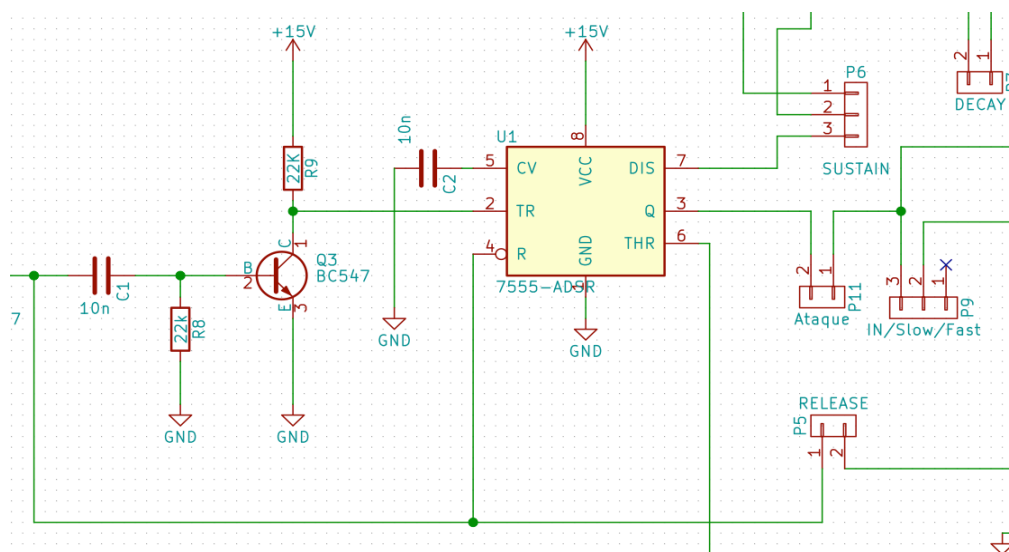


Figura 5.8. 7555 en el circuito

3. Perfilado del pulso

La envolvente cuenta de 4 etapas o periodos: ataque, decaimiento, sostenimiento y relajación. Por tanto, habrá que contemplar este comportamiento en el control del 7555.

Se utilizarán dos condensadores de tantalio de distinta capacidad, 10 μF y 1 μF , ya que la carga y descarga de este componente será el recurso que se empleará para perfilar el pulso de salida. Se utilizan dos capacidades diferentes para que el usuario pueda seleccionar velocidades de carga más rápidas o más lentas, y se incorpora un interruptor para facilitar esta conexión.

La carga del condensador estará limitada por una resistencia variable de valor $1\text{M}\Omega$ y constituirá la primera etapa de la envolvente, Figura 5.9. Para mejorar el comportamiento del selector de velocidades, junto con el cambio de condensador, también se produce un cambio de resistencia, que se situará en serie con el potenciómetro de ataque (1).

Para la descarga del condensador, en el periodo de decaimiento, se emplea un funcionamiento similar, apoyándose de resistencias variables que contrarresten dicha descarga (2). Pero en este caso hay que tener en cuenta el periodo de sostenimiento, por tanto se habilita un potenciómetro que marcará el nivel hasta el que se descargará el condensador (3).

Una vez que la señal de disparo concluye, el 7555 se resetea y el condensador termina de descargarse a través de la última resistencia variable que finaliza los 4 periodos de la envolvente (4).

Esta señal pasa a su vez por un diodo Led situado a la salida, representando de manera visual las etapas y el estado de la envolvente.

Se habilitan dos salidas independientes, una representa la envolvente de manera creciente y la otra con la misma forma, pero con una conducta decreciente.

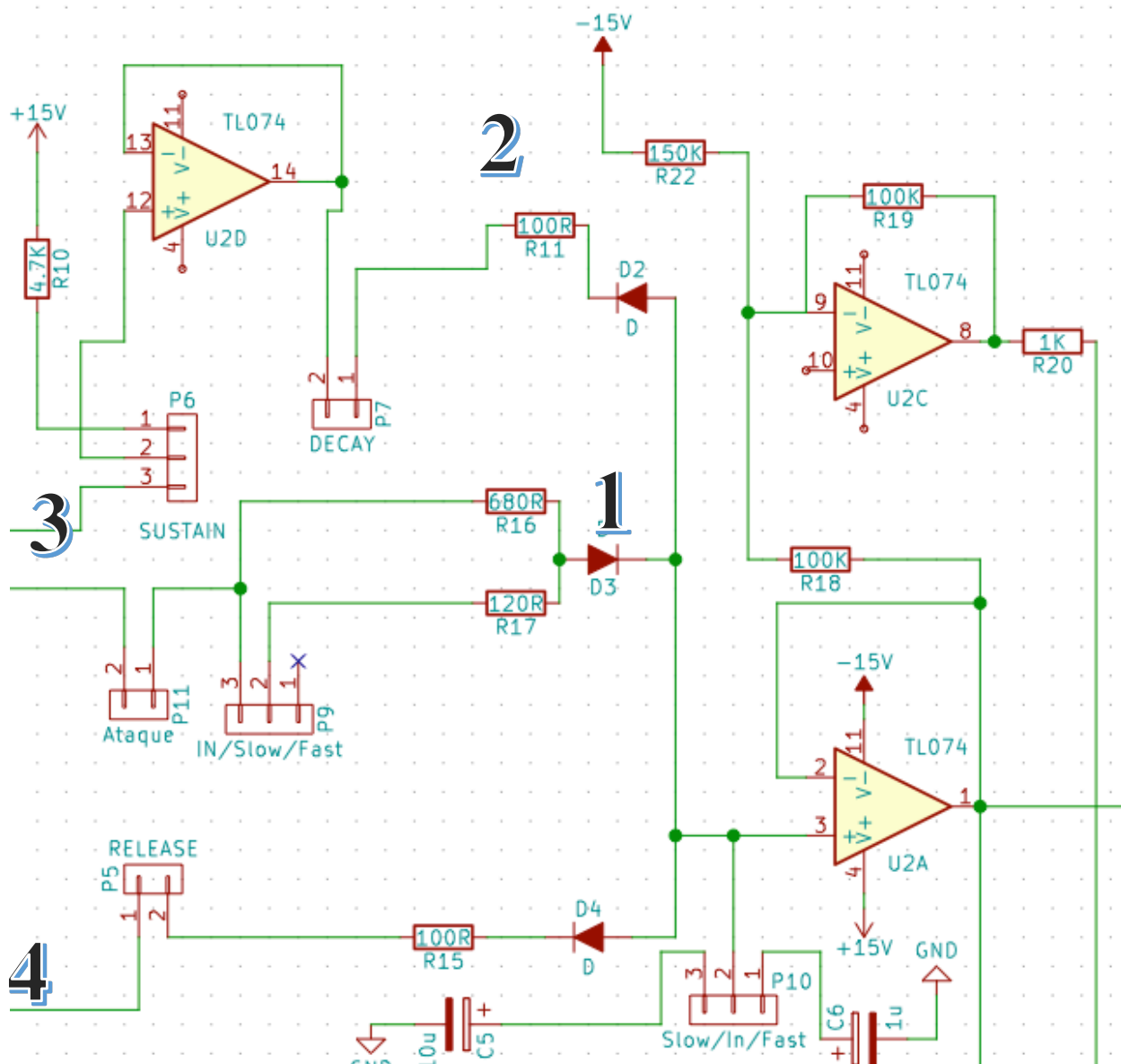
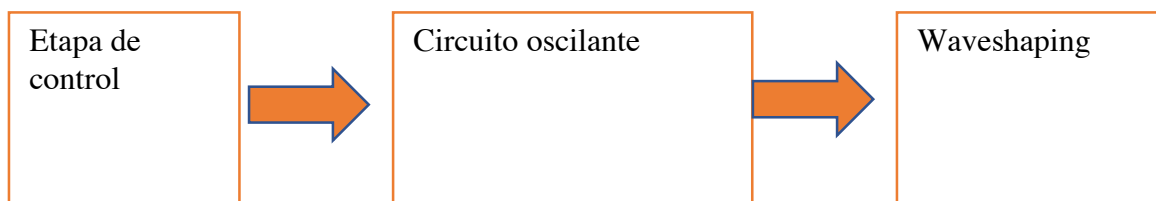


Figura 5.9. Etapas de la envolvente

5.4 Circuito del Oscilador de Baja Frecuencia

A la hora de plantear este módulo, consistente en un oscilador de baja frecuencia, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones de diseño:

- Contará con un selector de la frecuencia de oscilación
- La oscilación podrá ser modulada por una señal externa
- La cantidad de modulación aplicada a la frecuencia podrá ser ajustada
- Se habilitará un interruptor capaz de alterar el límite de la velocidad de oscilación
- Presentará dos salidas con formas de onda diferentes



1. Etapa de control

Este oscilador presenta un comportamiento similar al del VCO y la generación de la señal de diente de sierra se consigue con la ayuda de la carga de un condensador. Para controlar la frecuencia de oscilación se establece una relación con la intensidad suministrada al circuito oscilante, el transistor aumenta el paso de la corriente por el circuito proporcionalmente a la corriente suministrada en su base.

En la Figura 5.10 se detalla el circuito encargado de sumar todas las señales que modificarán la frecuencia: el potenciómetro dedicado y la entrada de modulación en frecuencia FM. Es un amplificador operacional LM741 actuando como sumador. Se incorpora una resistencia variable RV1 de 47k que establece el rango de oscilación del circuito.

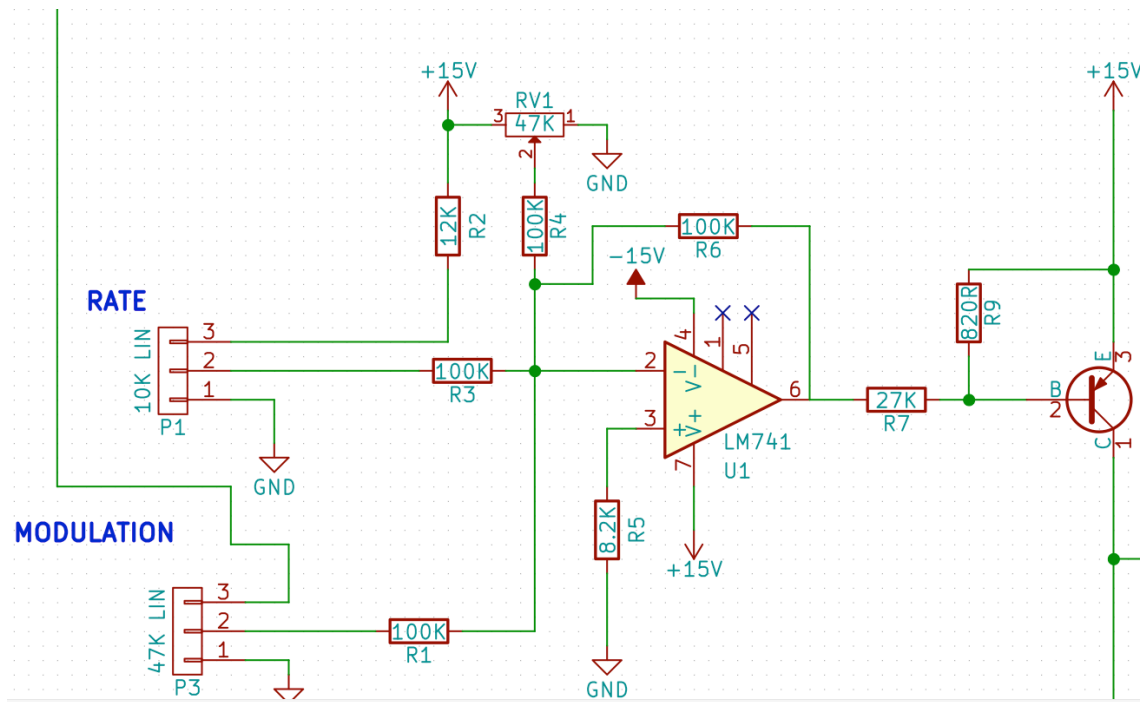


Figura 5.10. Etapa de control del LFO

2. Circuito oscilante

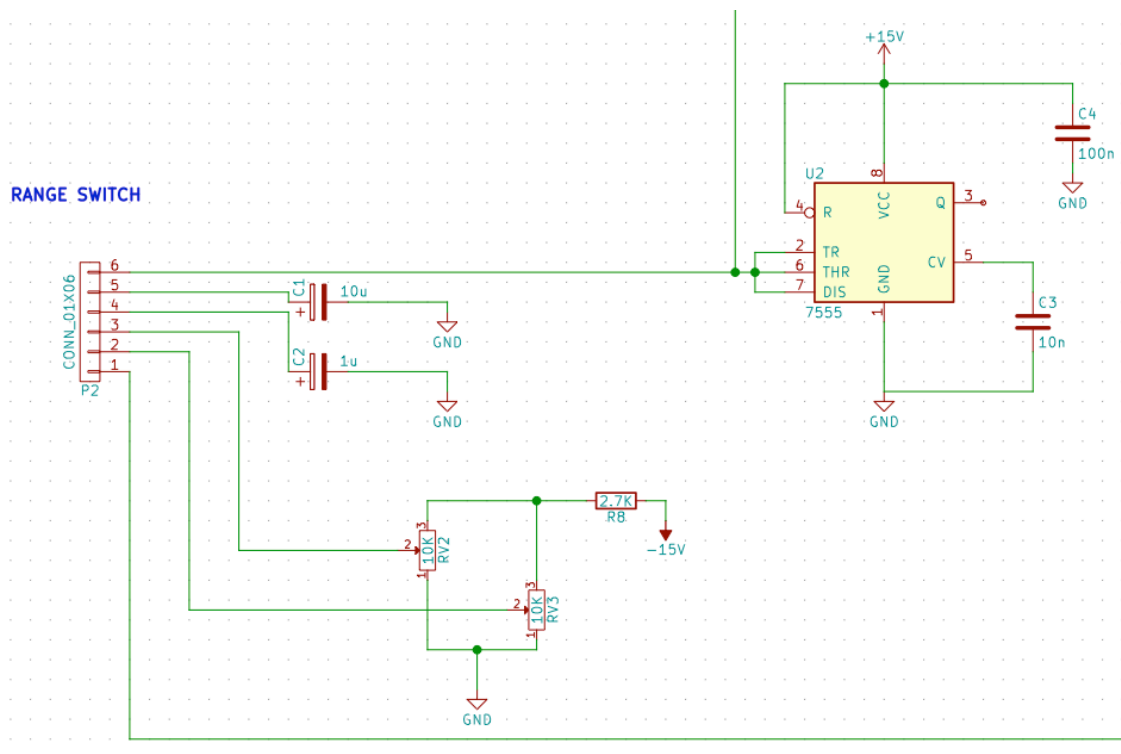


Figura 5.11. 7555 en modalidad astable

Para generar la oscilación se ha optado por emplear el integrado 7555, que también se aprovecha en el Generador de envolvente, pero en este caso, se utiliza en su configuración astable, actuando de oscilador. Como se vio en el ADSR, se incorporan 2 condensadores, pudiendo seleccionar entre uno y otro, y modificar la velocidad de carga y descarga. El 7555 incorpora 3 resistencias internas de 5k y estas definen un valor umbral a partir del cual el temporizador cambia su comportamiento y descarga el circuito.

La tensión aplicada al circuito es de 15 V, debido al divisor de tensión interno del 7555 se fija una tensión umbral de 10 V. Cuando la tensión en el condensador alcanza estos 10 V se activa el pin 7 de descarga del 7555 y la tensión cae a 0. Como la tensión cae a 0 el ciclo se resetea y el condensador comienza de nuevo a cargarse linealmente.

3. Waveshaping

Gracias a la carga del condensador y a su rápida descarga consecuente con la oscilación, se obtiene una señal de sierra. Esta señal pasa directamente a una de las salidas, mientras en la otra se utiliza en una de las entradas de un comparador, que genera un pulso alto mientras la señal entrante sea positiva y un pulso bajo si es cero, al igual que sucedía en el VCO.

5.5 Circuito del Filtro Controlado por Voltaje

El diseño del filtro controlado por tensión parte de una idea original de Nyle Steiner que se aplicó por primera vez en un sintetizador comercial llamado Synthacon (Figura 5.12).

Este diseño se fundamenta en un filtro pasivo multimodo: paso bajo o Low Pass, paso alto o High Pass, y como la combinación de ambos, paso banda o Band Pass. El distinto modo de filtrado de sus armónicos se obtiene al introducir la señal de audio en tres puntos diferentes del circuito. Incorpora un amplificador operacional no inversor con ganancia variable para regular la resonancia del filtro, realimentando el circuito. Si se aumenta la Q (resonancia) de manera excesiva puede provocar que el circuito empiece a oscilar de manera independiente, por saturación del circuito [Steiner, N].

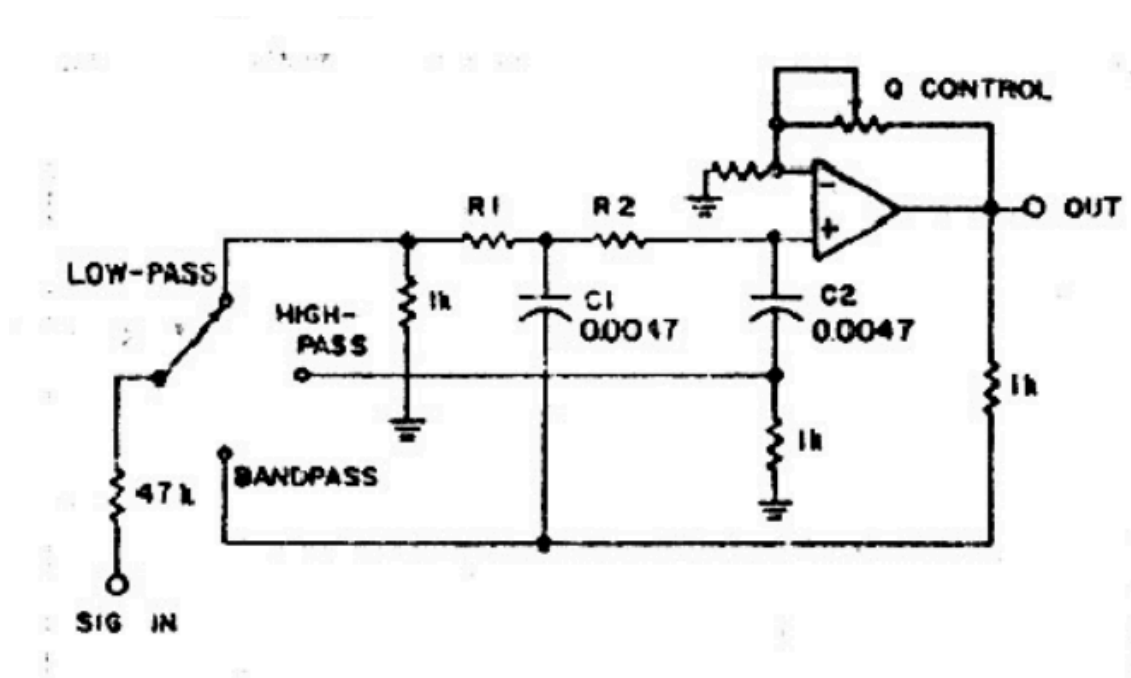


Figura 5.12. Recorte de la publicación original de Steiner en 1974

El funcionamiento de cualquier filtro radica en la capacidad de elementos inductivos, como bobinas y condensadores, de comportarse de manera distinta en función de la frecuencia de la señal que se les aplique. El uso predominante de los condensadores en el proceso de filtrado es una razón de lógica ya que sus valores están estandarizados, son componentes fáciles de encontrar en cualquier establecimiento de electrónica y su tamaño es menor que el de las bobinas.

Los condensadores presentan resistencia infinita al paso de corriente continua. El aumento de la frecuencia de señal entrante reduce la resistencia que el componente ofrece. Situado en serie con una resistencia actuará de filtro paso alto (Figura 5.13). Si se coloca

en paralelo a la resistencia y a su vez conectado a tierra facilitará el paso de corriente de alta frecuencia hacia masa por lo que se obtendrá un filtro paso bajo (Figura 5.14).

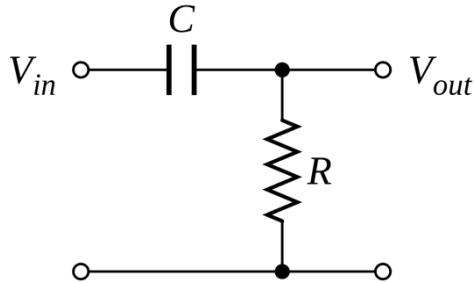


Figura 5.13. Filtro paso alto

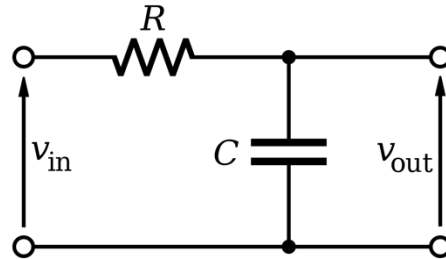


Figura 5.14. Filtro paso bajo

La frecuencia de corte del filtro se define por el par entre una resistencia junto a un condensador, para el ajuste preciso de este parámetro se plantean tres alternativas:

- **Un condensador variable**, se descarta esta alternativa por ser poco práctica, debido a la dificultad de ser encontrados y de ser manipulados.
- **Una resistencia variable**, esta alternativa facilita la tarea, en el mercado se encuentran en forma de potenciómetros metálicos y robustos, con el fin de ser manejados cómodamente [Dimopoulos, H].
- **Un voltaje entrante variable**, permitir que una señal externa modifique la frecuencia equivale a programar el movimiento del filtro sin necesidad de manipularlo manualmente.

Como sucedía con el VCA esta corriente dinámica, dependiente de un voltaje entrante, se consigue gracias a un par diferencial de transistores. Al aplicar esta solución la frecuencia de corte se adaptará a la señal externa de modulación. Los transistores del par diferencial aplican el voltaje a la cadena de diodos con fases contrarias. Las fases opuestas cancelan la tensión de control de tal manera que no aparece a la salida.

El circuito incluye potenciómetros para el control de la ganancia de la señal de audio entrante y de la señal moduladora. Un Switch rotatorio de cuatro posiciones permite seleccionar el tipo de filtrado que se requiere en cada caso.

5.6 Circuito del Generador de Ruido

Este módulo será el único que no cuente con ningún parámetro controlable, siendo sus salidas:

- Generación de ruido blanco
- Generación de ruido rosa
- Generación de pulsos de amplitud aleatoria

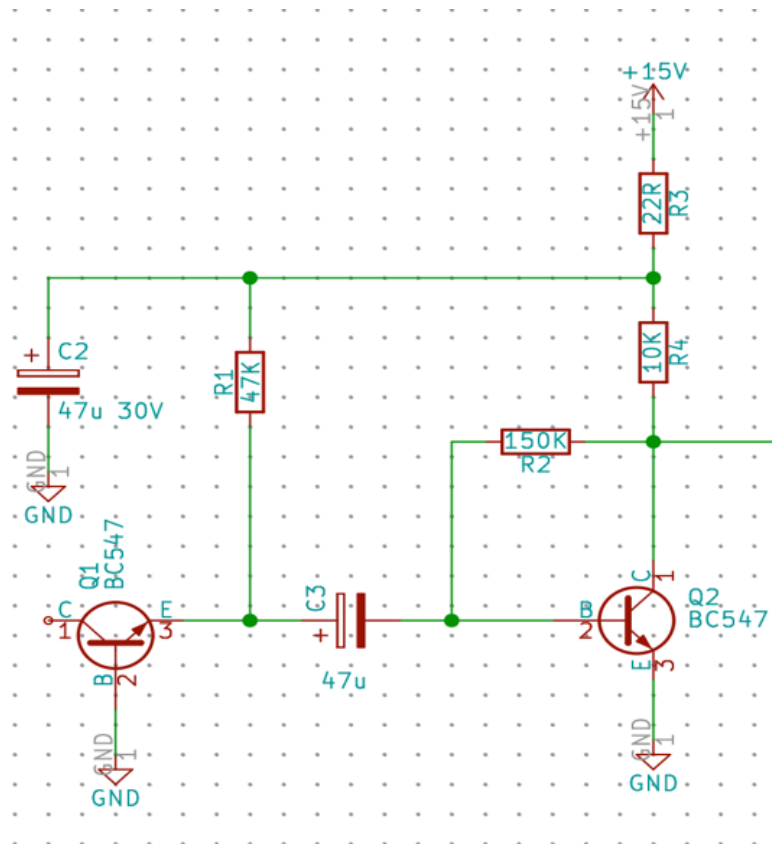
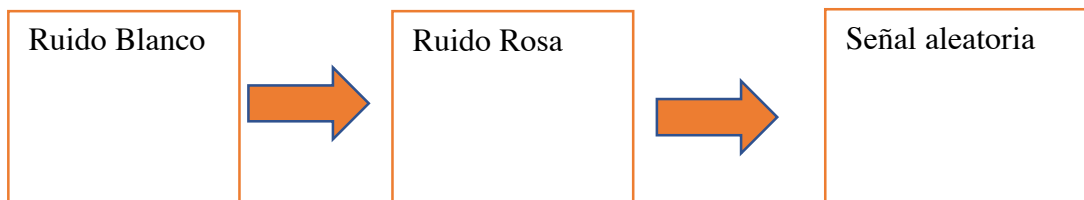


Figura 5.15. Transistor con colector abierto, genera ruido térmico

1. Generación de ruido blanco

Que un circuito electrónico genere ruido equivale a que se comporte como una fuente de tensiones aleatorias. La mayoría de los generadores de ruido se fundamentan en captar ruido térmico, causado por el movimiento aleatorio de los electrones en el ambiente, y amplificarlo hasta cierto nivel audible[Stanford].

Cuando un transistor se polariza de manera inversa genera ruido térmico al dejar el colector sin conectar (Figura 5.15). Otro transistor se encarga de amplificar la señal ruidosa [Marston, R], un condensador elimina la componente continua de la señal y, por último, un operacional amplifica el resultado actuando como filtro paso-banda.

2. Procesamiento

Un banco de resistencias y condensadores en paralelo situado a la salida del segundo transistor se encarga del filtrado. Con una pendiente de 3dB/oct, este filtro produce ruido rosa a su salida.

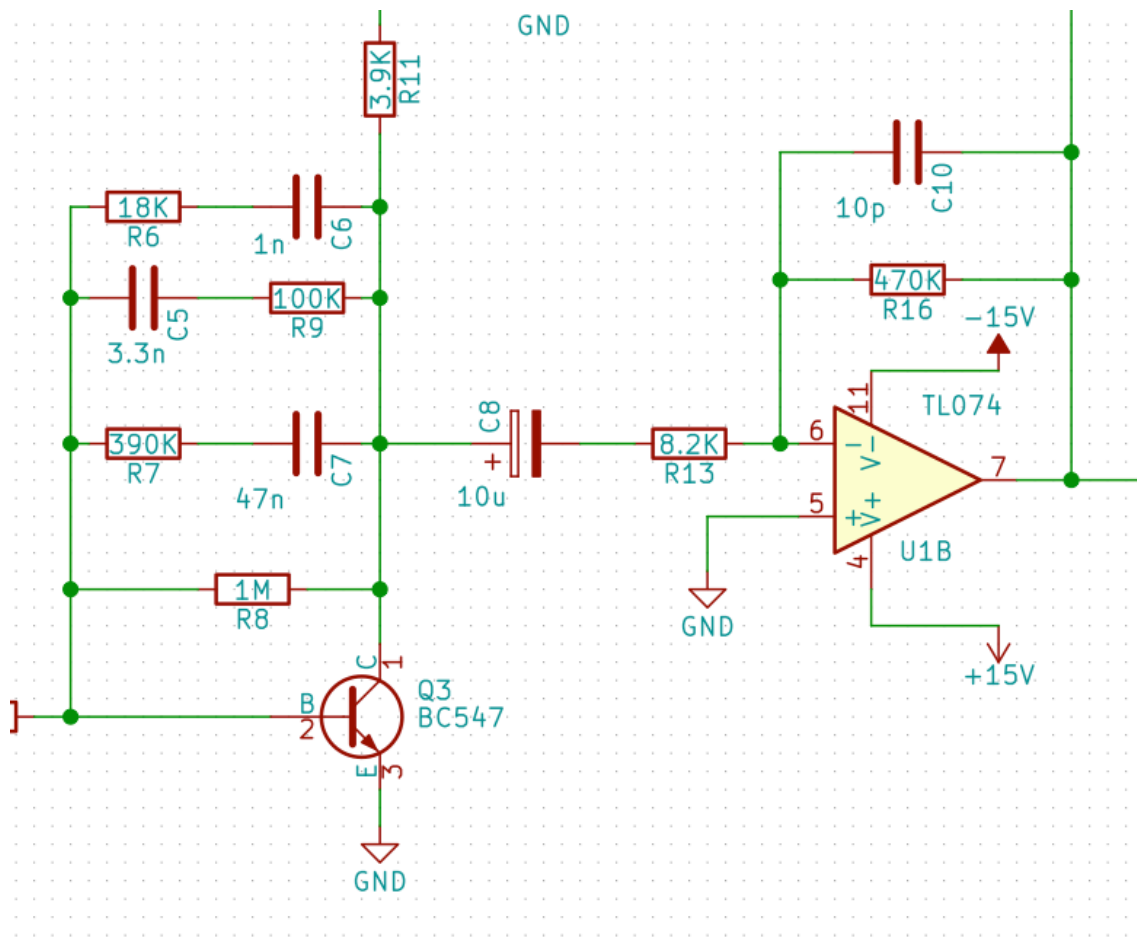


Figura 5.16. Filtrado del ruido blanco

Al pasar por dos amplificadores operacionales el ruido rosa pasa a ser una fuente de tensiones aleatoria con variaciones lentas. El primer operacional trabaja como filtro paso bajo de segundo orden con una frecuencia de corte de 5 Hz. El segundo también es un filtro paso bajo con una pendiente de 6dB/octava y una frecuencia de corte de 4.7 Hz.

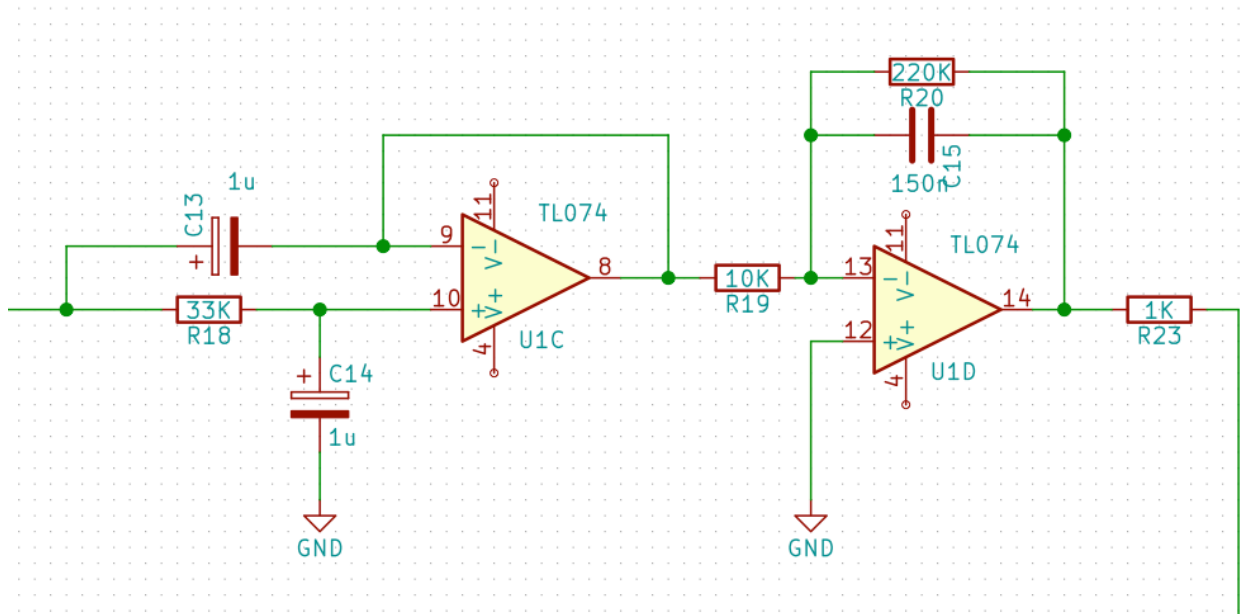


Figura 5.17. Señal aleatoria

5.7 Circuito del Mezclador

El mezclador debe ser implementado con las siguientes funciones:

- Capacidad de mezclar 3 entradas independientes, sin aporte de armónicos por parte del mezclador
- Control de amplitud de cada una de las señales entrantes
- Debe incorporar un diodo Led para representar de manera visual la intensidad resultante

El mezclador es el módulo más simple de diseñar, ya que se fundamenta en el comportamiento como sumador del amplificador operacional y por tanto sólo precisa de este integrado [Kennedy, E]. Como la señal resultante queda invertida por la propiedad del operacional se hace pasar por otro operacional que la restablece a su forma positiva.

Un led permite conocer el nivel de señal entrante. Permanecerá apagado en caso de que no haya señales entrantes o su amplitud sea muy débil.

Incluye potenciómetros que, actuando como divisores de tensión, establecen cada nivel de señal entrante; en la Figura 5.18 se muestra una captura de la señal de salida del mezclador cuando recibe dos señales sinusoidales, una con el doble de frecuencia de la otra, estando una de ellas ligeramente atenuada.

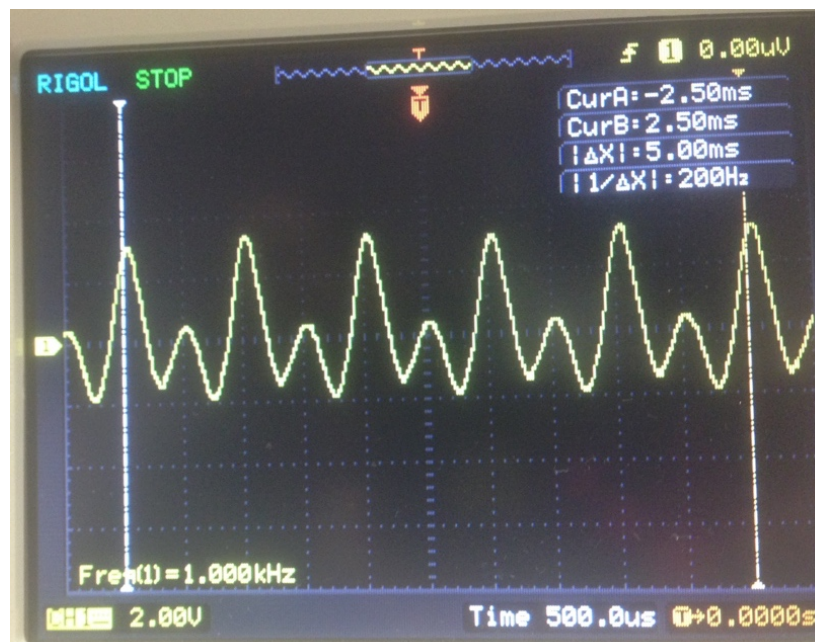


Figura 5.18. Captura del Mezclador con dos señales

5.8 Circuito del Módulo de Salida

El módulo de salida debe:

- Tratar la señal de manera limpia, sin aporte de armónicos
- Regular los niveles de tensión y corriente para adaptarlos a su escucha mediante auriculares

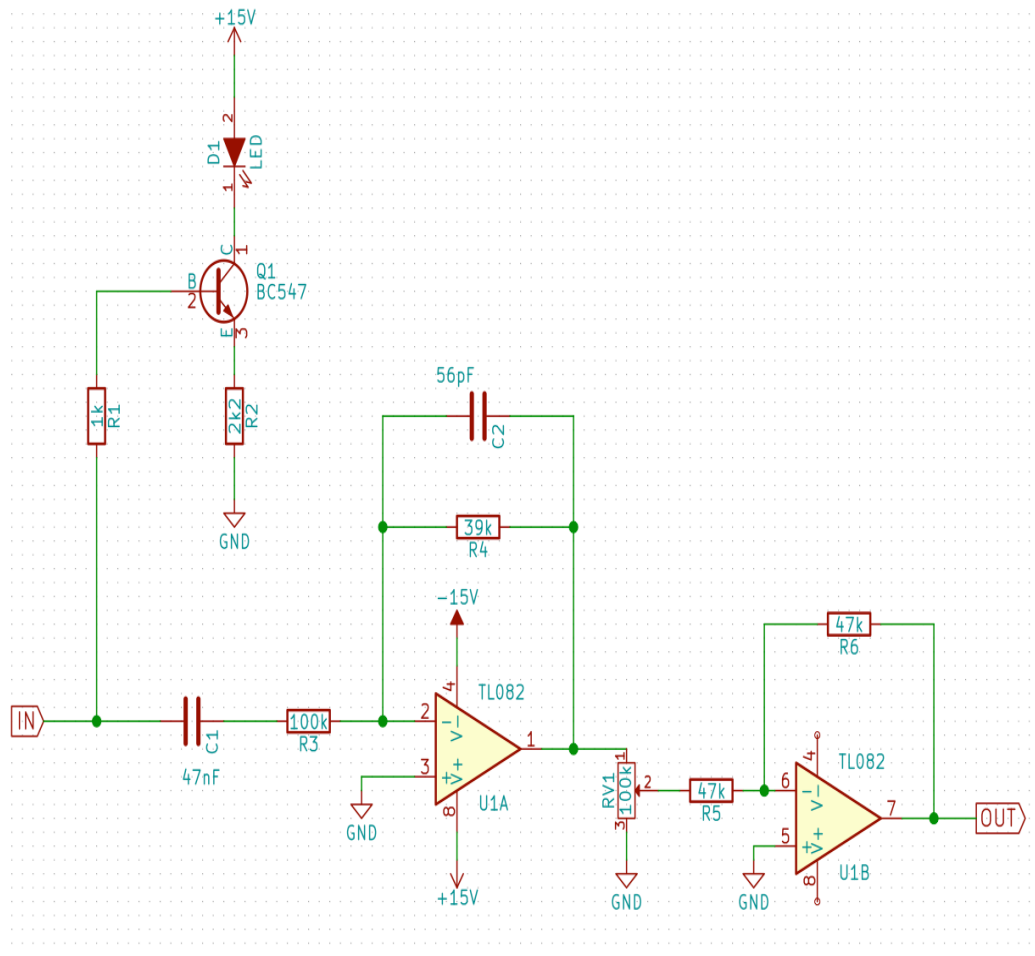


Figura 5.19. Circuito de Salida

A modo de ejemplo, se introduce una señal entrante senoidal de 10V de amplitud y con 3V de offset de continua (señal verde). Primero pasa por un condensador, que actúa como filtro de continua (señal rosa), y a su vez también excita la puerta de un transistor, iluminando el led de manera proporcional a su intensidad. Posteriormente su amplitud se ve reducida debido al par de resistencias del primer amplificador operacional y la señal

se invierte (señal azul). El potenciómetro regula la amplitud de la señal de salida y su uso es el de controlar el volumen. El segundo amplificador operacional, de ganancia unitaria, devuelve a la señal invertida su configuración inicial (señal gris).

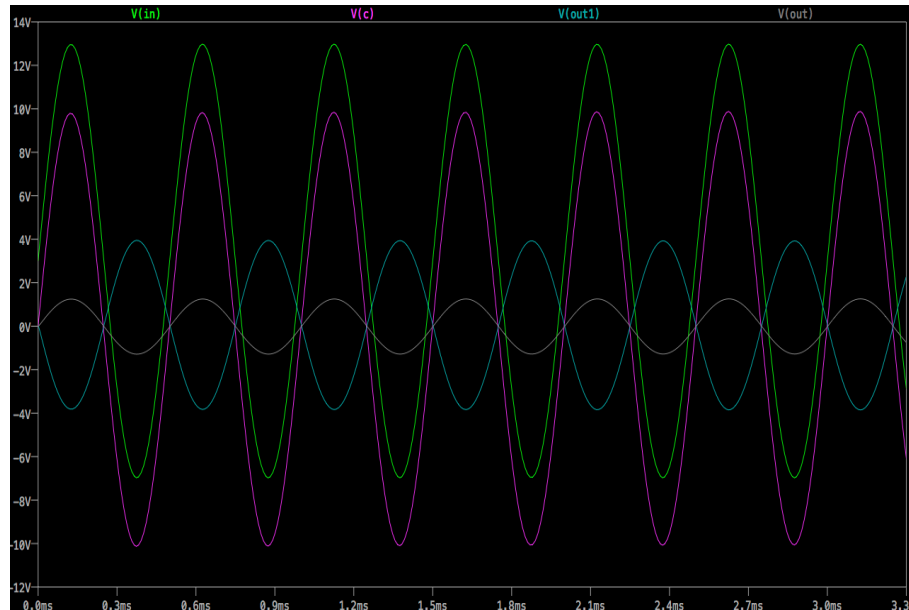


Figura 5.20. Ejemplo del comportamiento de una señal en el módulo de salida

Si se realiza un análisis frecuencial, se comprueba que los condensadores situados en la entrada y en la realimentación del primer amplificador operacional actúan como un filtro paso banda, estableciendo el corte en los límites del rango audible.

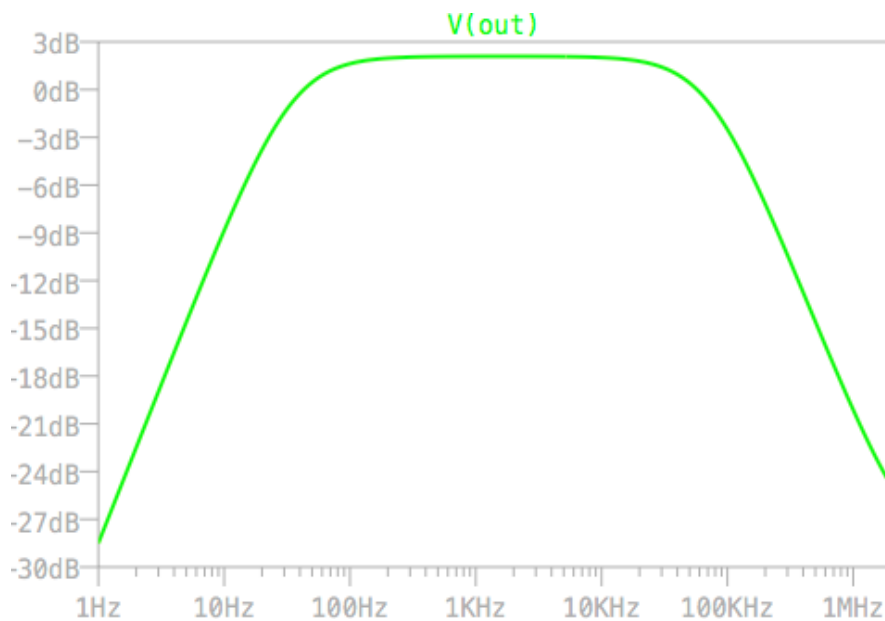


Figura 5.21. Filtrado de la señal de salida

Capítulo 6.- Resultados experimentales

Tras diseñar, simular y construir cada uno de los módulos que componen el sintetizador se analizaron las placas definitivas ya ensambladas en un laboratorio de electrónica. Para su análisis fueron precisas las siguientes herramientas:

- **Multímetro**, empleado principalmente como medidor de tensión en los pines de alimentación. También es capaz de indicar continuidad con un indicador acústico, esto equivale a saber si dos puntos diferentes del circuito se encuentran conectados eléctricamente o no.
- **Generador de señales**, capaz de generar formas de onda del tipo, la frecuencia y la amplitud deseadas. Se requiere una señal de entrada fiable para calibrar y comprobar el funcionamiento preciso de los módulos.
- **Fuentes de alimentación**, se necesitan dos fuentes de alimentación para suministrar las tensiones positiva y negativa que hacen funcionar el sistema. Para los ensayos de laboratorio fueron necesarias dos fuentes independientes, pero también se puede emplear una única fuente capaz de suministrar +15V y -15V.
- **Osciloscopio**, mide la forma de onda de cualquier señal y gracias a sus dos sondas se puede comparar la señal de entrada con la de salida, facilitando el ajuste del circuito para estabilizar su comportamiento.

Cada módulo debe revisarse individualmente antes de su ensamblado comprobando continuidad en las pistas y comparando la placa con su recreación virtual 3D. Una vez

que la placa no presenta ningún defecto de fabricación se procede a la incorporación y soldado de los componentes, en el siguiente orden:

1. Resistencias y diodos
2. Circuitos integrados
3. Condensadores
4. Conexionado externo (pines de alimentación y potenciómetros)

Una vez todos los componentes se encuentran emplazados se revisa una vez más la continuidad en el circuito y si todo es correcto se procede a alimentar el circuito. Cuando se conecta la alimentación se verifica que los integrados reciben dicha alimentación y que los puntos críticos del circuito se comportan de la manera que deben.

Cada módulo se someterá a los siguientes ensayos:

- Responder de manera acorde a su diseño a cualquier perturbación en sus entradas
- Ser capaces de recibir alimentación, tanto por sus entradas como por sus salidas, y, de la misma manera, ser capaces de transmitirla
- Capturas del osciloscopio de diferentes ensayos en solitario y acompañados de más módulos
- Consumo de corriente de cada módulo

Determinados módulos precisan de una ligera calibración que regule su comportamiento y esta será detallada en cada uno de los siguientes apartados. En la Figura 6-1 se muestran todas las placas conectadas entre sí.

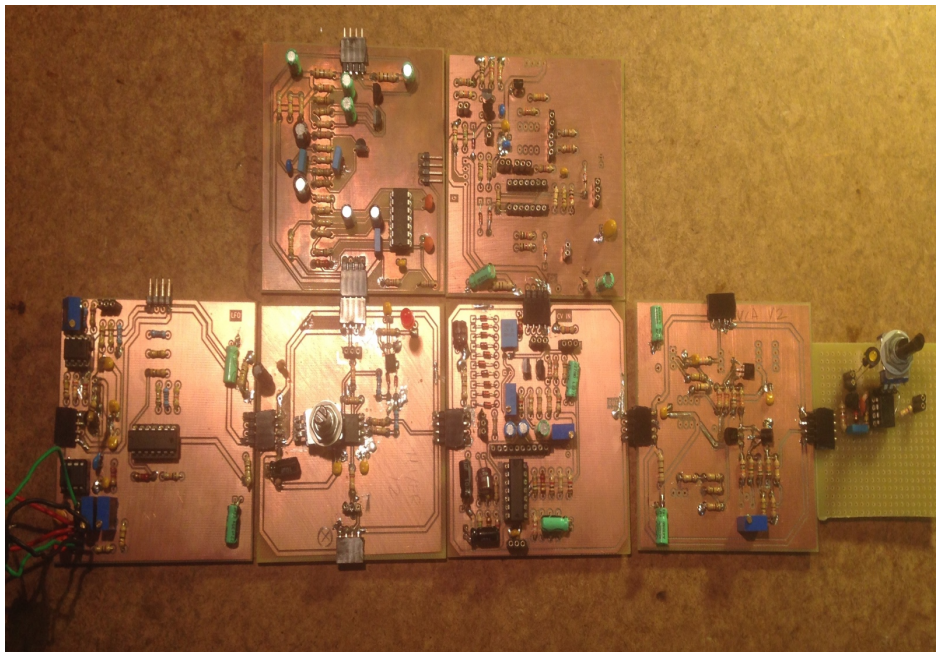


Figura 6.1. Placas que forman el sistema

6.1 Oscilador controlado por Voltaje

1) Simulación 3D

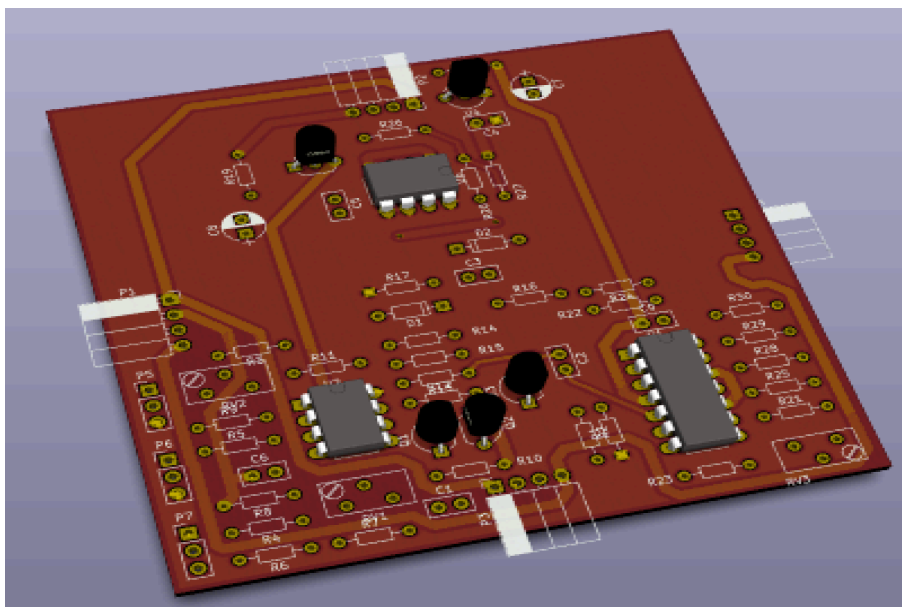


Figura 6.2. Simulación 3D VCO

2) PCB finalizada

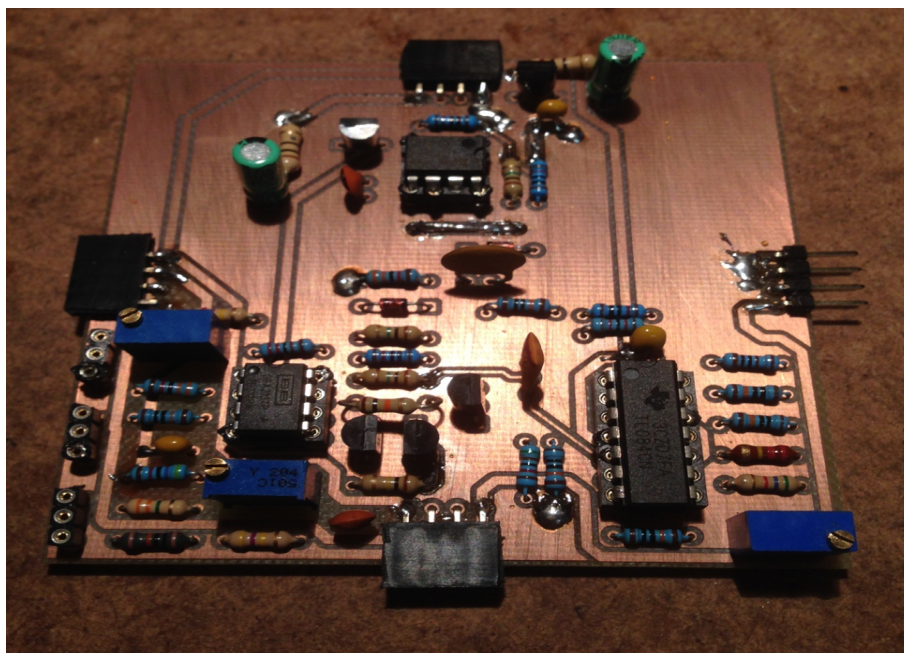


Figura 6.3. PCB VCO

3) Capturas osciloscopio

En la siguiente Figura se observa la señal generada por el Oscilador Controlado por Voltaje. Es una señal de rampa, con poca distorsión, oscilando en rango audible.

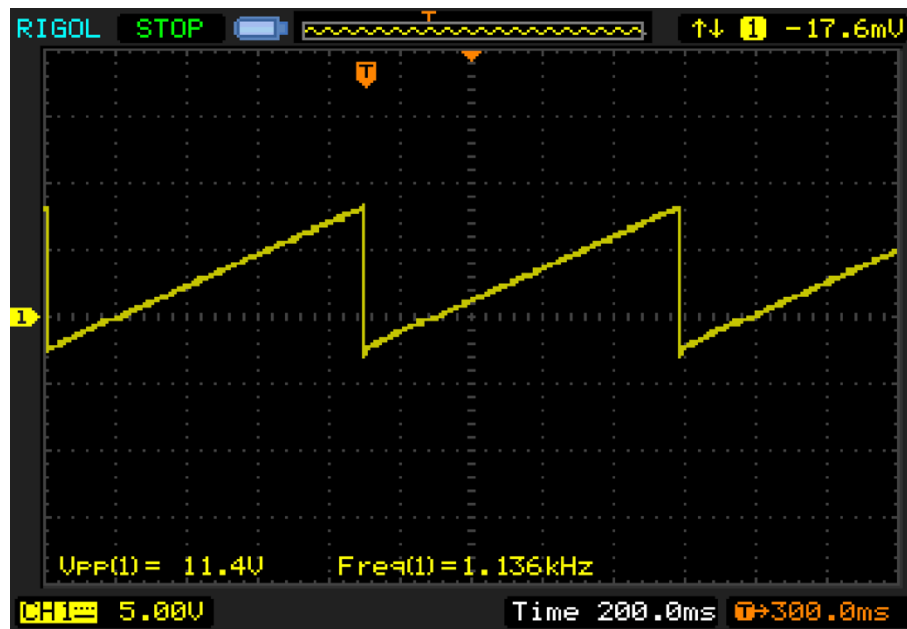


Figura 6.4. Captura del VCO

4) Consumo

+15V:	11 mA
-15V:	9 mA

5) Calibración

La regulación precisa de la frecuencia a la que oscila este módulo recae sobre dos trimmers RV1 y RV2. Para ajustar la frecuencia de la señal de salida se debe conectar un voltaje de entrada de 1V y regular ambos potenciómetros hasta que la frecuencia de la señal de salida sea de 110 Hz, lo que corresponde a la nota La.

Posteriormente se introduce una señal de 2V esperando un resultado a la salida de 220 Hz, si no es así, se repetirá el ajuste anterior de los trimmers.

6.2 Amplificador Controlado por Voltaje

1) Simulación 3D

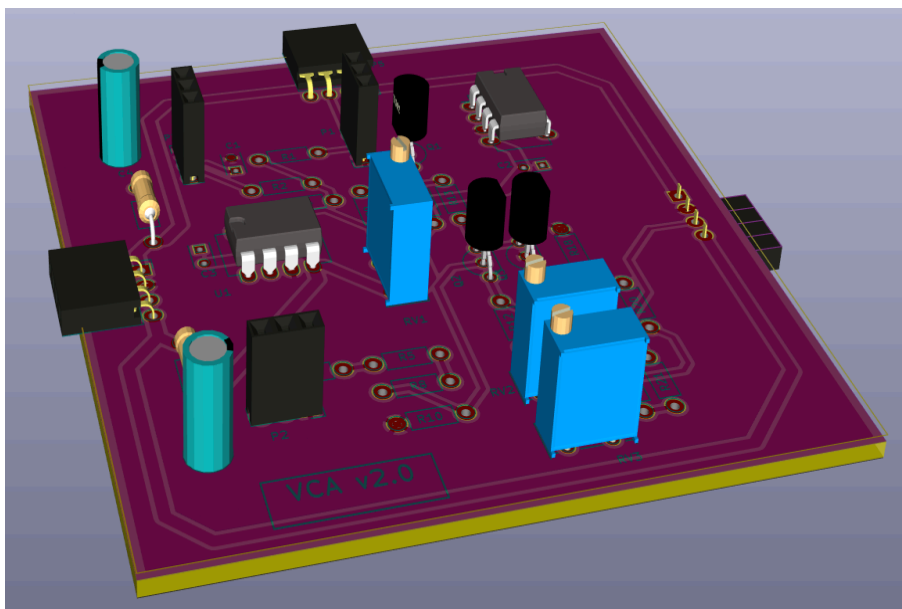


Figura 6.5. Simulación 3D VCA

2) PCB finalizada

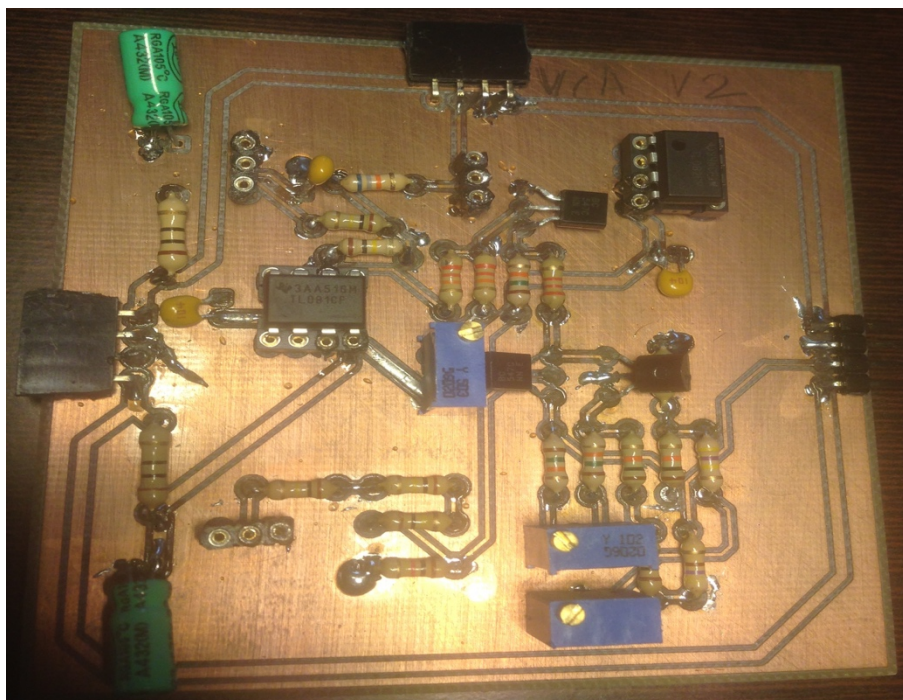


Figura 6.6. PCB VCA

3) Capturas osciloscopio

En las siguientes Figuras se analiza el comportamiento del VCA, introduciendo una señal de audio en su entrada de señal *IN* (amarillo) y una envolvente ADSR en su entrada de modulación (azul). La amplitud de la señal entrante evoluciona proporcionalmente a las etapas de la envolvente y ambas alcanzan su amplitud máxima a la vez.

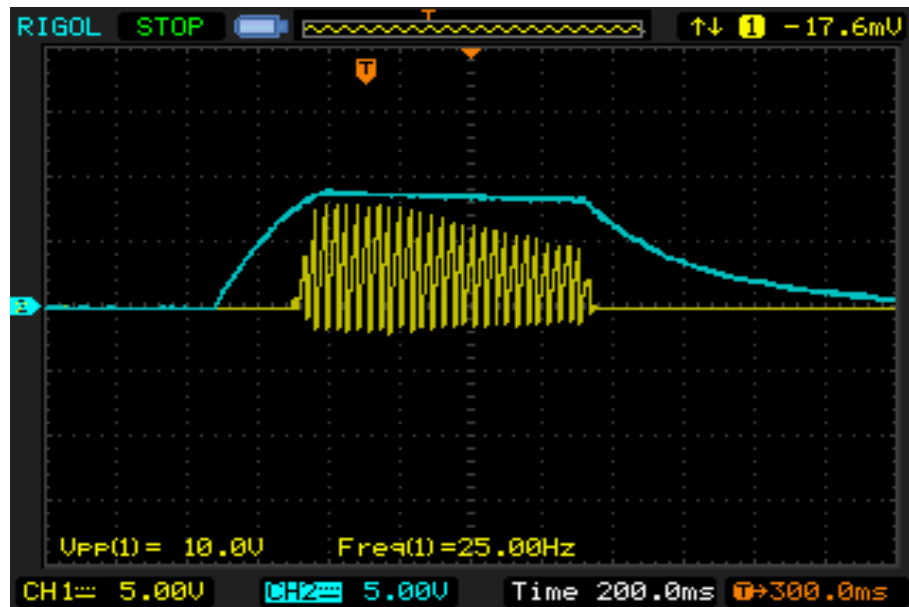


Figura 6.7. Modulación en amplitud 1

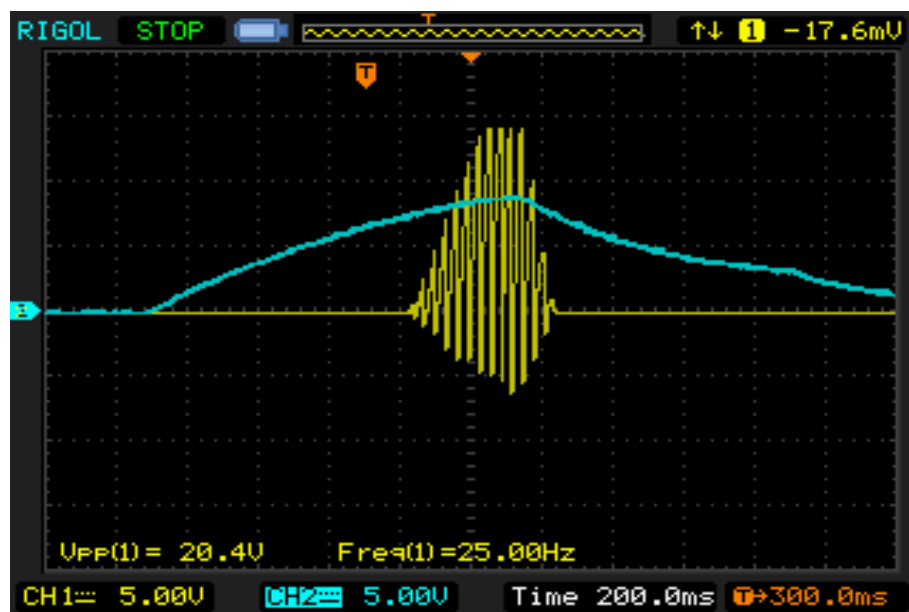


Figura 6.8. Modulación en amplitud 2

4) Consumo

+15V:	7 mA
-15V:	3 mA

5) Calibración

El VCA necesita ser calibrado para ajustar su comportamiento:

- Ajustar el Trimmer RV2 para obtener una onda completamente simétrica a la salida
- Ajustar el Trimmer RV1 para silenciar completamente la señal de entrada cuando no aparece una señal externa de modulación
- Ajustar el Trimmer RV3 para ajustar completamente la salida a 0V cuando no aparece una señal externa de modulación

6.3 Generador de envolvente

1) Simulación 3D

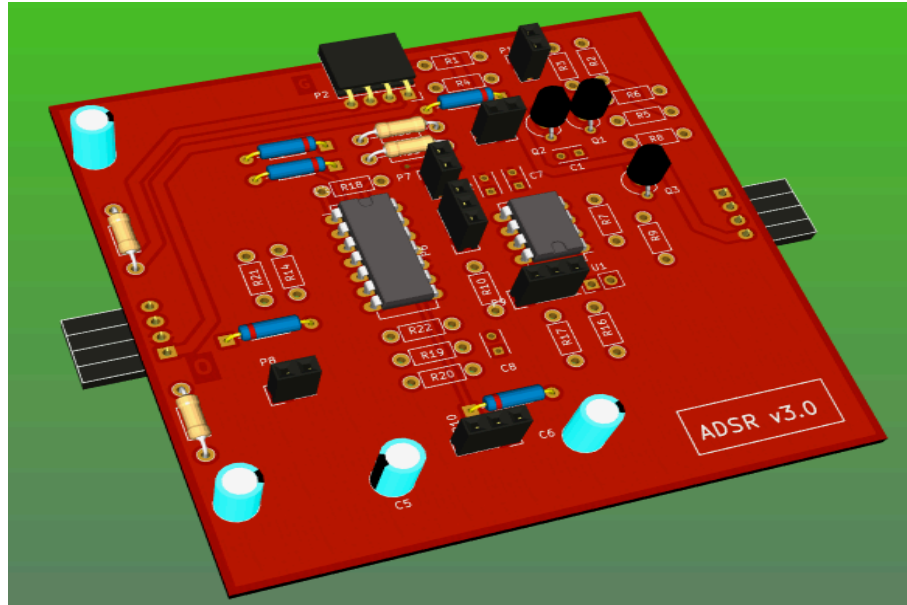


Figura 6.9. Simulación 3D ADSR

2) PCB finalizada

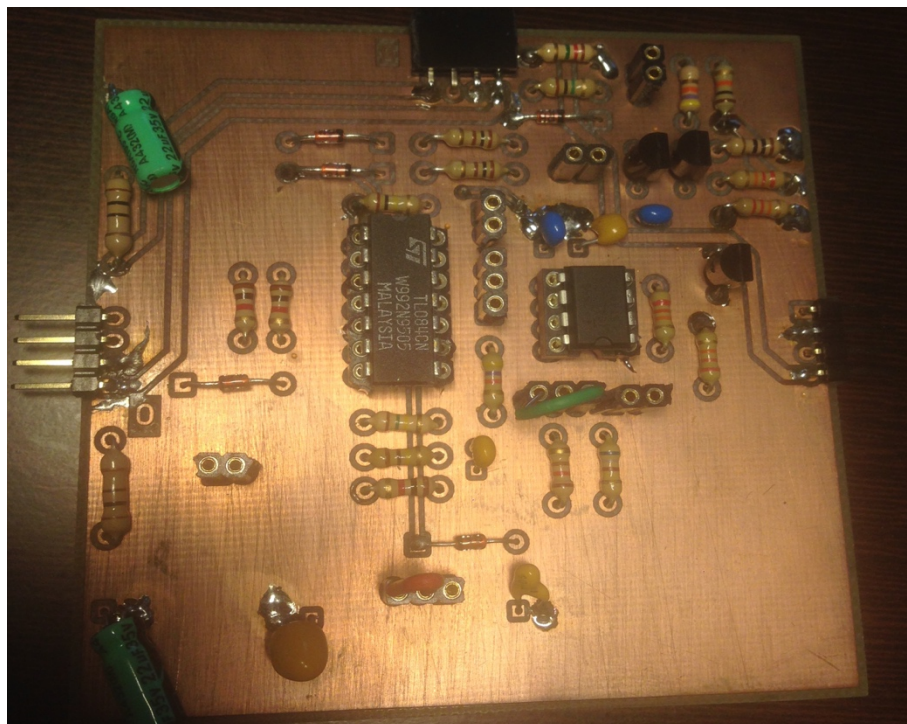


Figura 6.10. PCB ADSR

3) Capturas osciloscopio

En la Figura 6.11 se representa un pulso cuadrado (azul) que actúa como disparador de la envolvente. La envolvente presenta la siguiente configuración:

- Ataque rápido
- Decaimiento medio
- Sostenimiento nulo
- Relajación nula

Mientras el pulso esté en alto la envolvente debe llegar a los 10 V durante el periodo de Ataque y, acto seguido, reducir dicho voltaje. Si el pulso está en bajo, la envolvente deja de actuar.

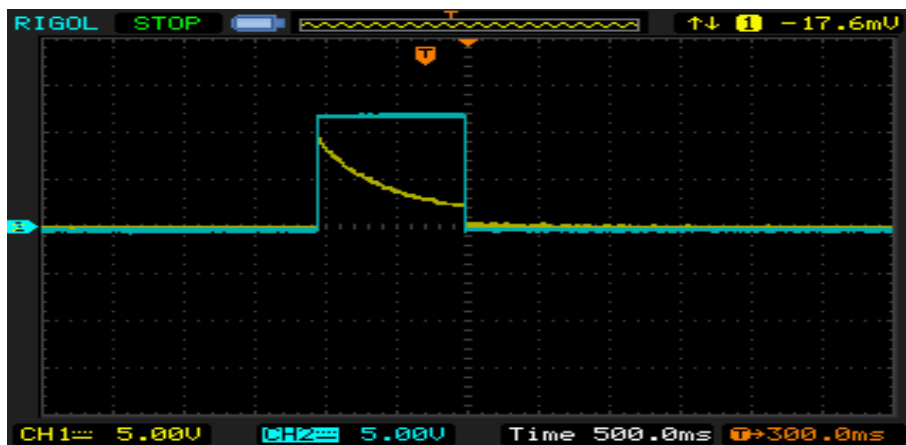


Figura 6.11. Primera configuración

La siguiente Figura muestra una envolvente con un Ataque y un Decaimiento mucho más lentos que la anterior.

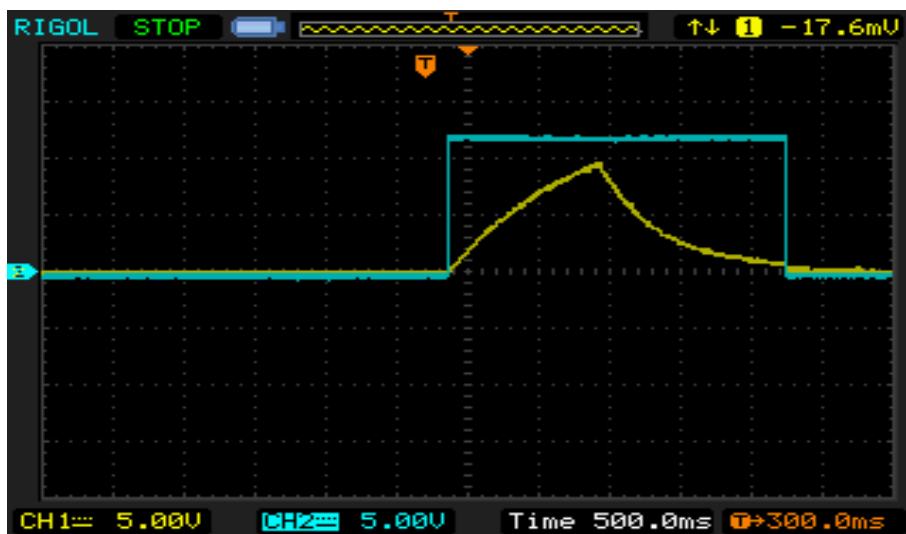


Figura 6.12. Segunda configuración

En la Figura 6.13 la envolvente presenta la siguiente configuración:

- Ataque medio
- Decaimiento medio
- Sostenimiento medio
- Relajación media

Por tanto, mientras el pulso esté en alto, la envolvente alcanza 10V en el periodo de Ataque, el voltaje se reduce lentamente, con un ritmo definido por el Decaimiento, hasta el nivel marcado por el Sostenimiento. La envolvente permanecerá en este estado hasta que el pulso caiga a 0, acto seguido el voltaje caerá por la etapa de Relajación.

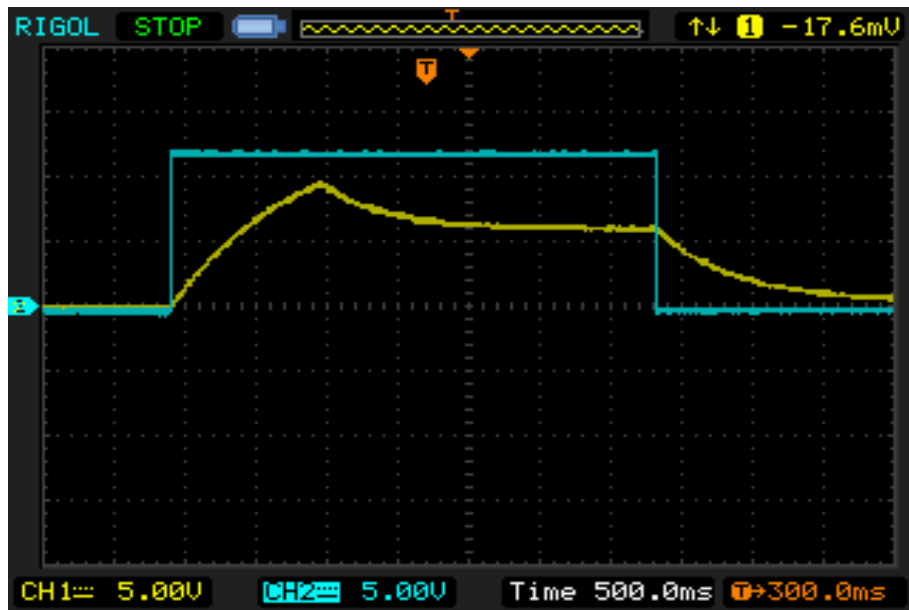


Figura 6.13. Tercera configuración

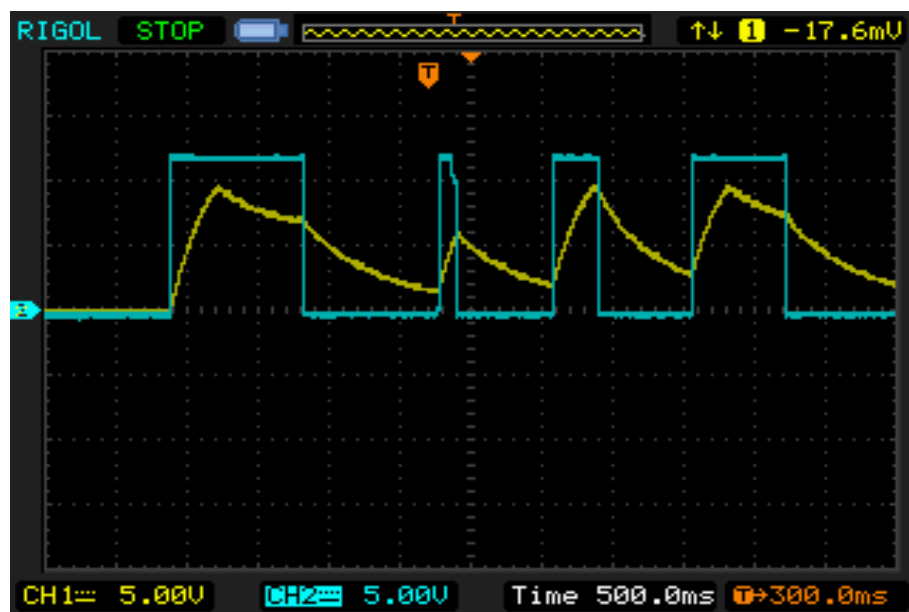


Figura 6.14. Cuarta configuración

En la Figura anterior (Figura 6.14) se contempla el comportamiento de la envolvente al recibir un tren de pulsos, en función de la duración de dichos pulsos la envolvente podrá completar todas sus etapas (primera envolvente) o solamente la etapa de Ataque y Relajación (tercera envolvente). Nótese que si se recibe un pulso de entrada antes de la descarga completa del condensador la envolvente no comienza desde un nivel de 0V.

4) Consumo

+15V:	8 mA
-15V:	10 mA

5) Calibración

La envolvente no precisa de calibración.

6.4 Oscilador de Baja Frecuencia

1) Simulación 3D

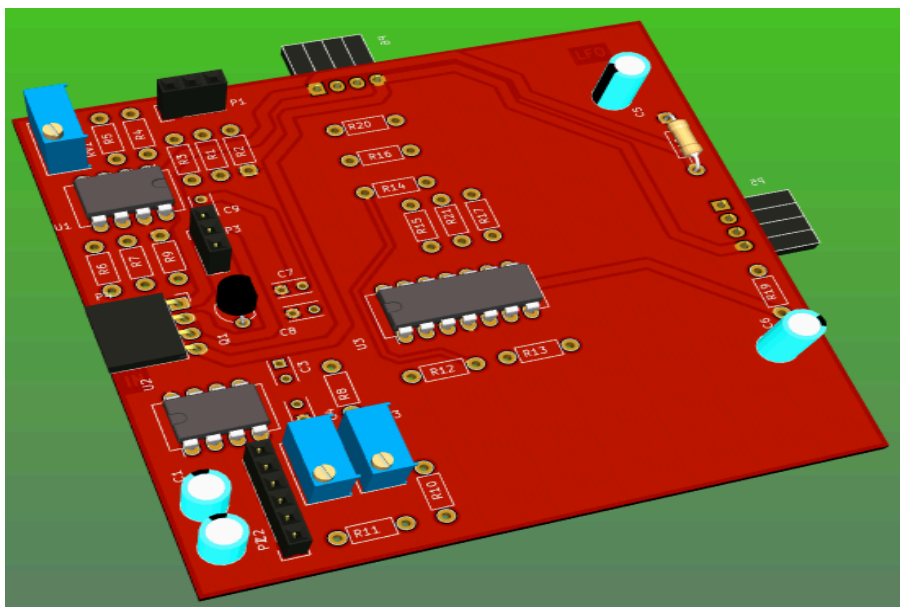


Figura 6.15. Simulación 3D LFO

2) PCB finalizada

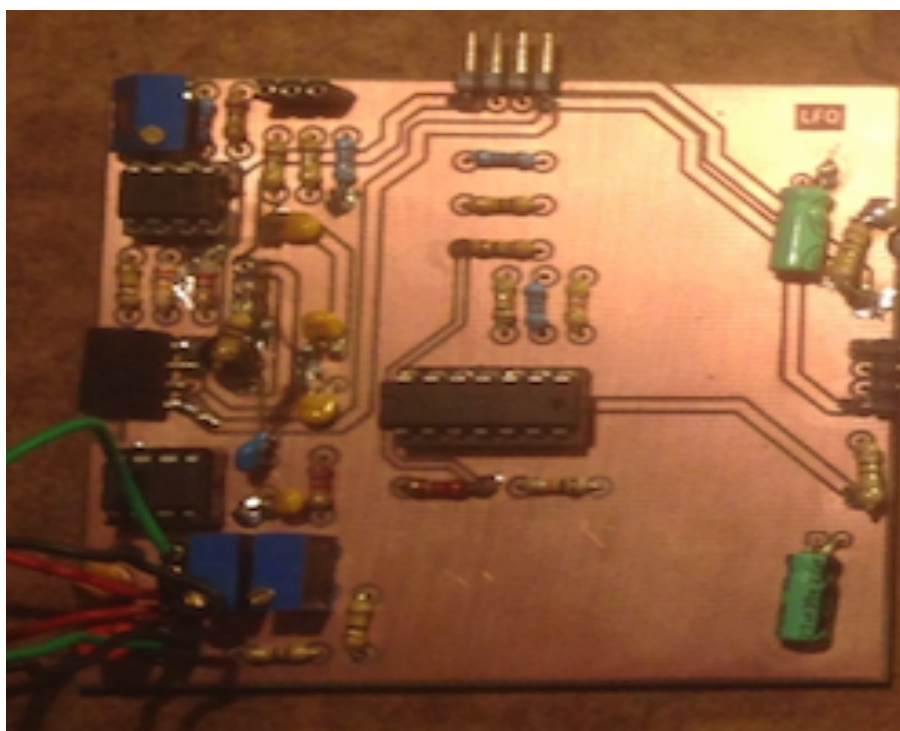


Figura 6.16. PCB LFO

3) Capturas osciloscopio

En las Figuras siguientes se representa una señal de diente de sierra generada por el LFO, su amplitud pico a pico es de aproximadamente 10 V y su rango de frecuencias puede ir desde unos pocos miliHertzios hasta más de 10 Hz.

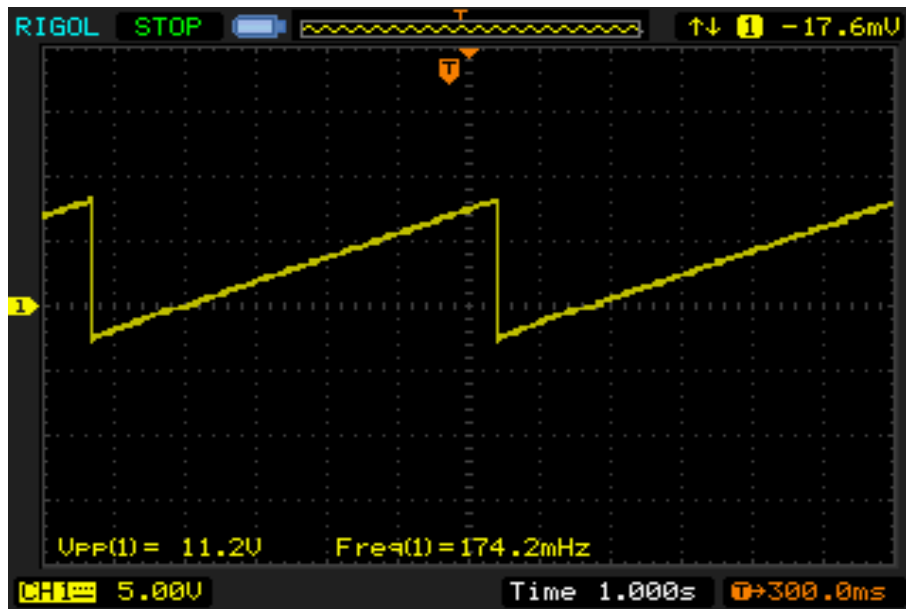


Figura 6.17. Diente de sierra 175 mHz

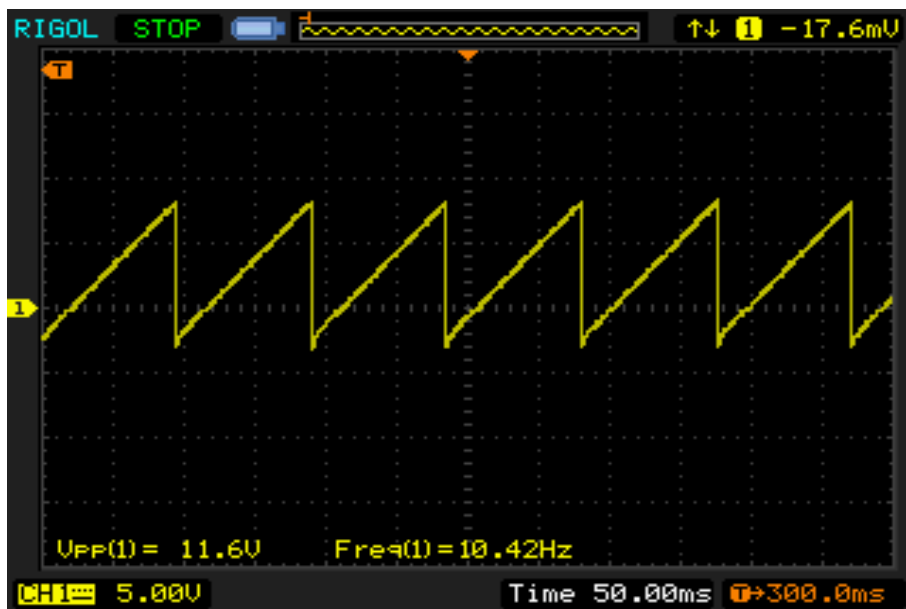


Figura 6.18. Diente de sierra 10,5 Hz

En la Figura 6.19 se representa la otra salida disponible del LFO, la señal cuadrada (amarillo), siendo modulada en frecuencia por una envolvente (azul). A medida que la tensión aumenta en la entrada de modulación la frecuencia de oscilación también aumenta, proporcionalmente.

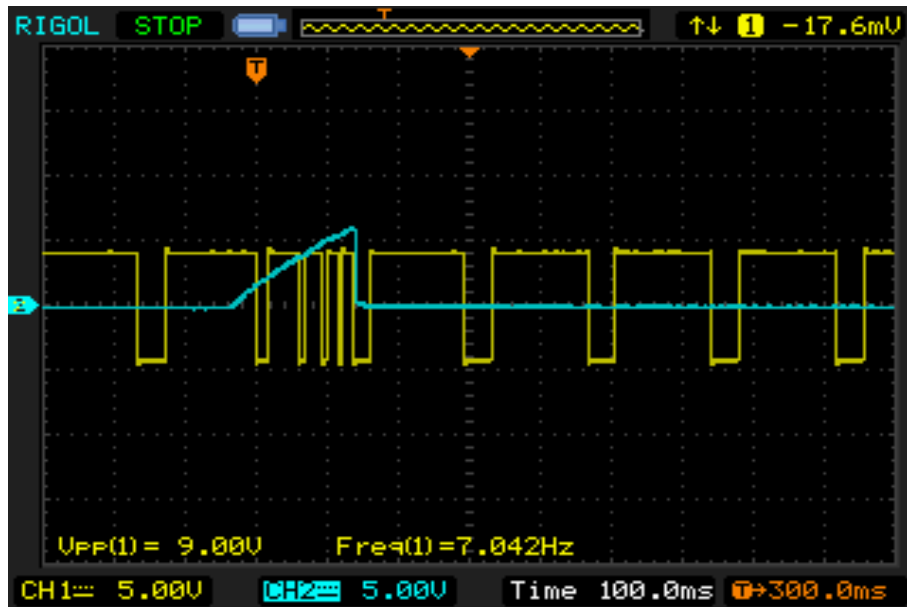


Figura 6.19. Señal cuadrada en FM

4) Consumo

+15V:	16 mA
-15V:	12 mA

5) Calibración

El LFO debe ser calibrado para ajustar su comportamiento:

- Con el Trimmer RV1 se define el rango de frecuencias
- Con el Trimmer RV2 se da una forma perfecta a la señal de diente de sierra cuando el LFO se encuentra en modo lento
- Con el Trimmer R32 se da una forma perfecta a la señal de diente de sierra cuando el LFO se encuentra en modo rápido

6.5 Filtro Controlado por Voltaje

1) Simulación 3D

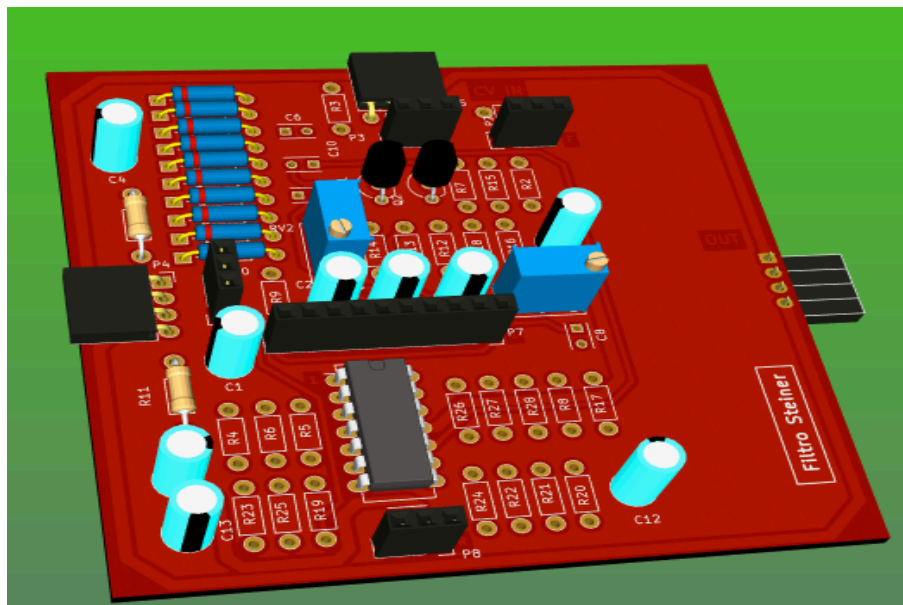


Figura 6.20. Simulación 3D Filtro

2) PCB finalizada

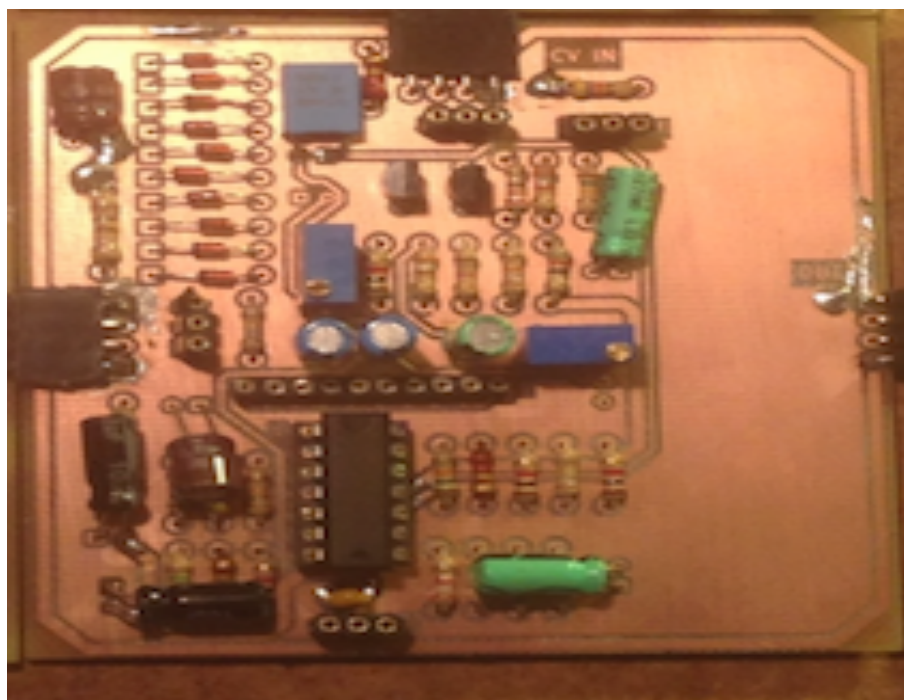


Figura 6.21. PCB Filtro

3) Capturas osciloscopio

Se introduce una señal de diente de sierra del VCO (señal azul) en el filtro, configurado en modo paso-bajo. A medida que se reduce el contenido armónico la forma de onda se va suavizando en sus vértices y se asemeja a una señal senoidal. La frecuencia de la señal no debe ser modificada y su voltaje pico a pico tampoco.



Figura 6.22. Filtrado de diente de sierra 1

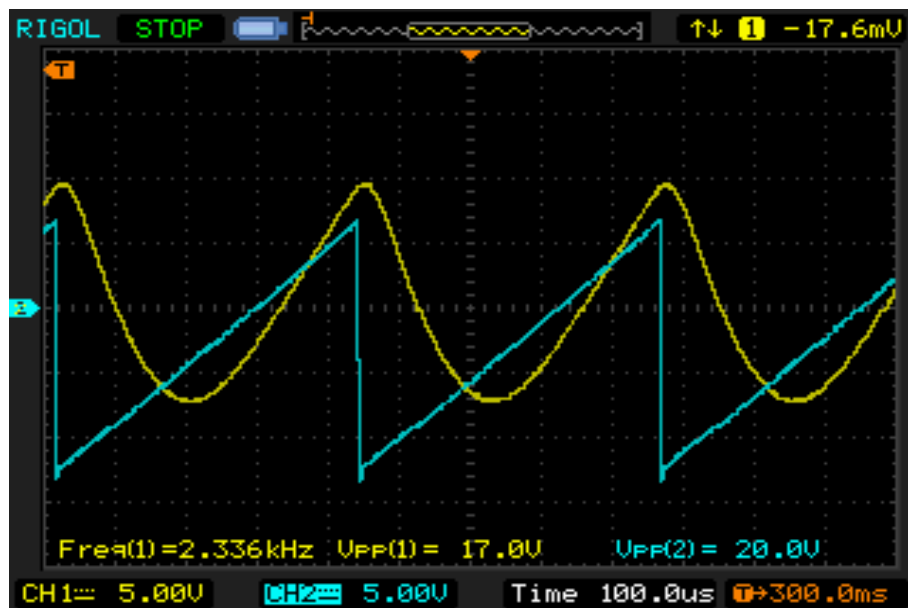


Figura 6.23. Filtrado de diente de sierra 2

Si se aumenta la resonancia del filtro hasta cierto límite, el circuito empieza a auto-oscilar, generando una señal senoidal pura y sin necesidad de introducir ninguna señal. La frecuencia de corte del filtro determina la frecuencia de oscilación de la señal senoidal generada. Este comportamiento se cumple y se encuentra representado en la Figura siguiente.

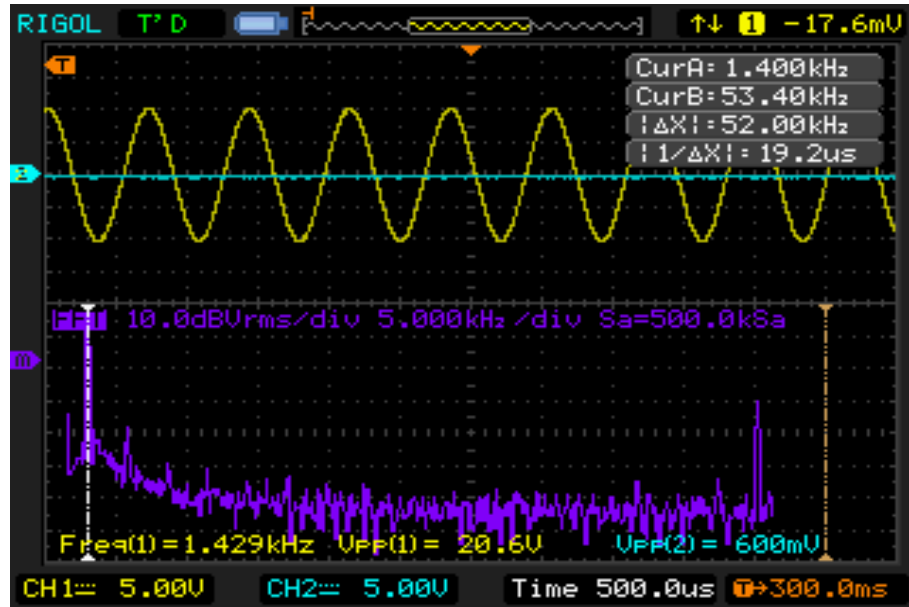


Figura 6.24. Filtro oscilando

Posteriormente se introduce una señal cuadrada en el filtro, en la parte superior de la imagen se representa la forma de onda y en la parte inferior se representa su contenido armónico. A medida que el filtro actúa, la forma de onda de la señal cuadrada empieza a suavizar sus vértices mientras que sus armónicos más altos se reducen.

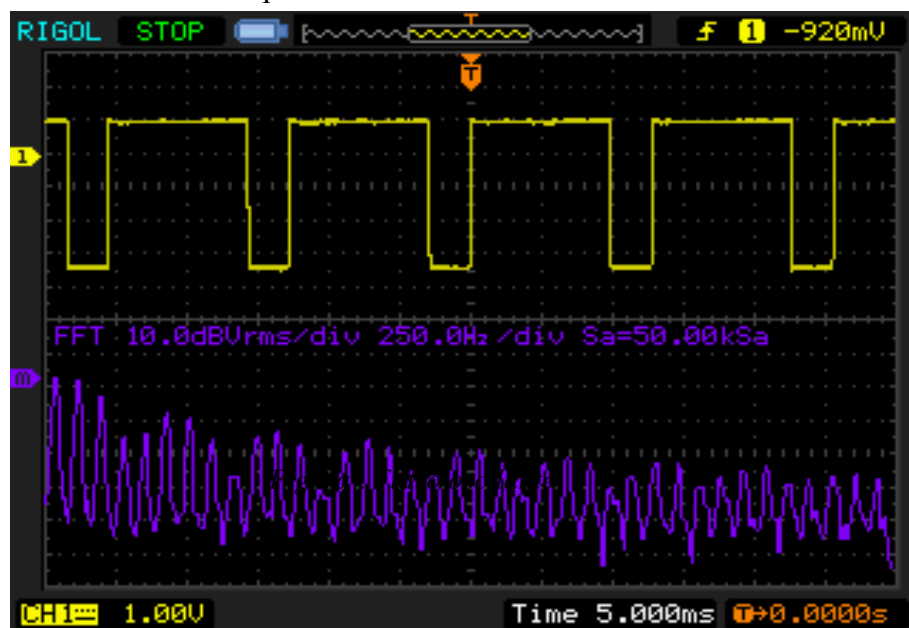


Figura 6.25. Filtrado de señal cuadrada 1

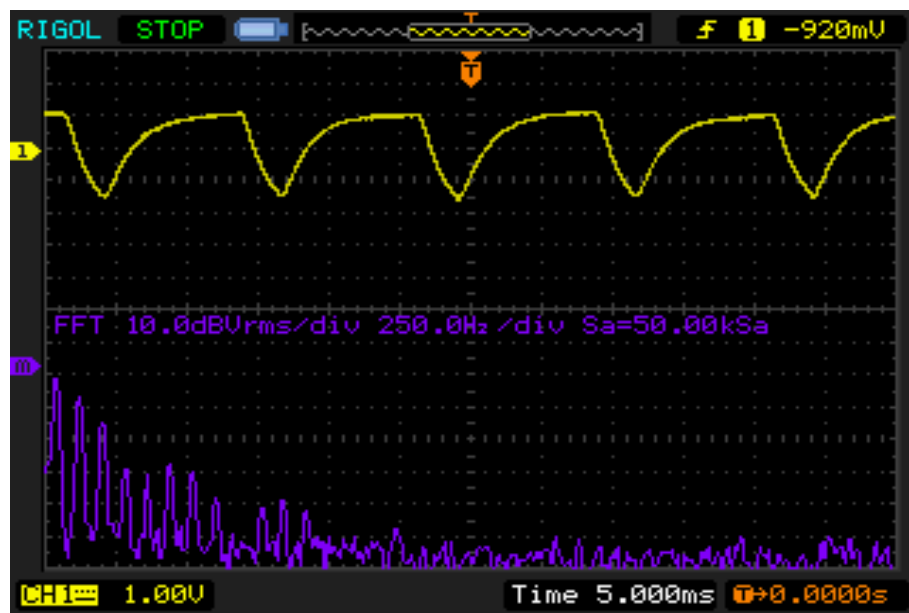


Figura 6.26. Filtrado de señal cuadrada 2

4) Consumo

+15V:	11 mA
-15V:	14 mA

5) Calibración

El circuito se calibra ajustando el Trimmer RV2, consiguiendo reducir al mínimo la señal continua que pueda aparecer por defectos del circuito.

6.6 Generador de Ruido

1) Simulación 3D

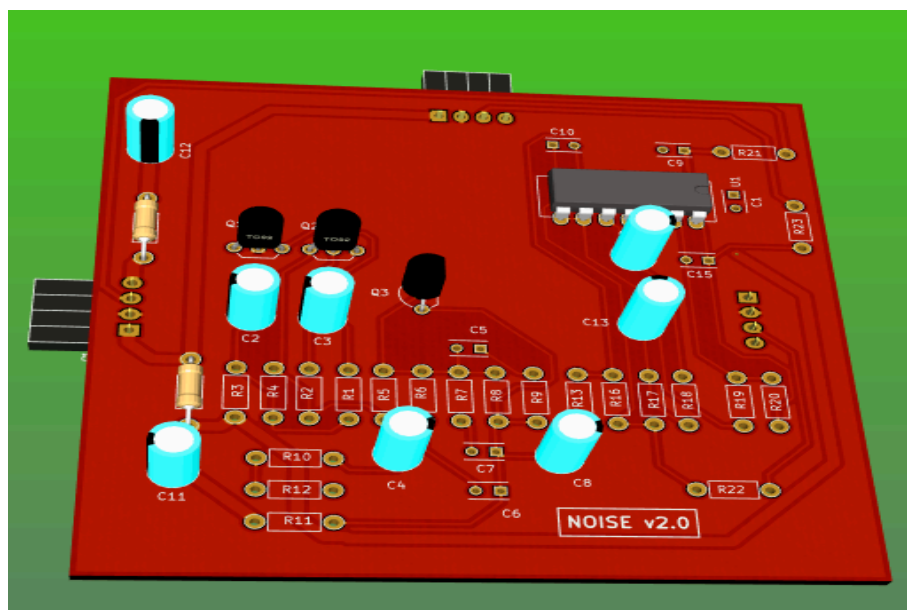


Figura 6.27. Simulación 3D Ruido

2) PCB finalizada

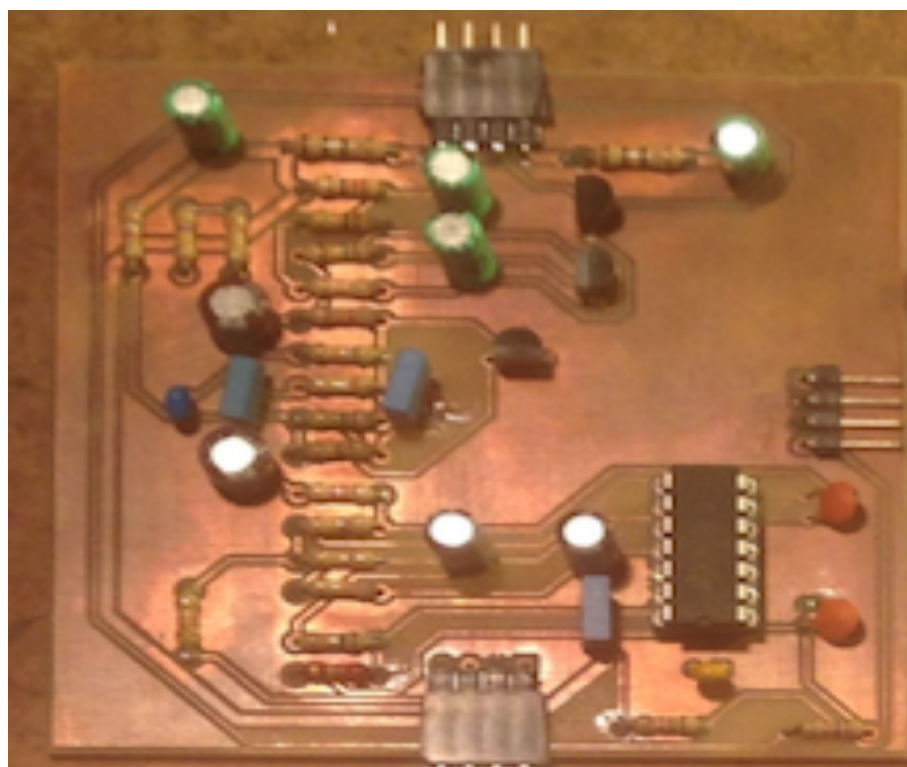


Figura 6.28. PCB Ruido

3) Capturas osciloscopio

El generador de ruido muestra una salida completamente aleatoria, acorde a su circuitería. Si se comprueban los armónicos de la salida de Ruido Blanco con respecto a la salida de Ruido Rosa se observa que este último presenta una atenuación de 3dB/octava.

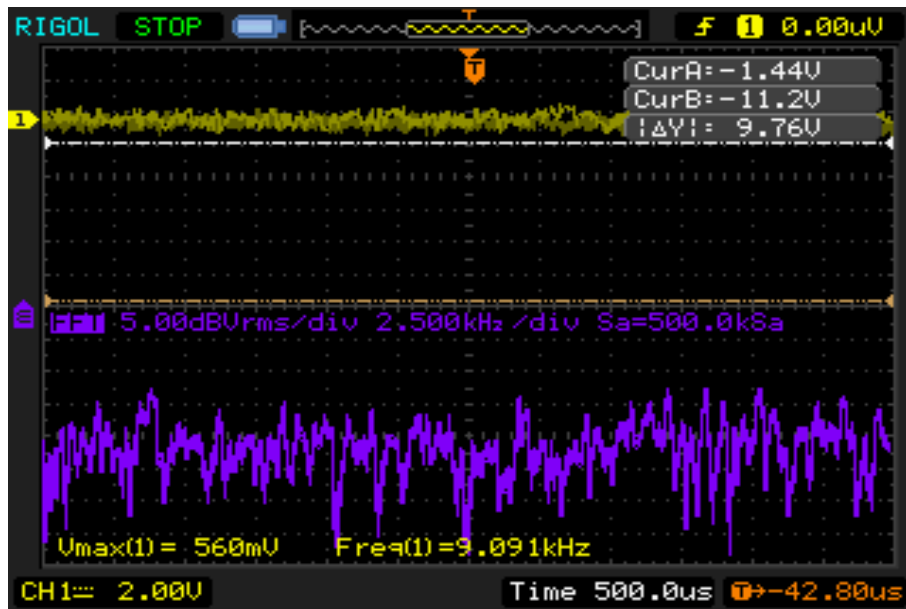


Figura 6.29. Ruido Blanco

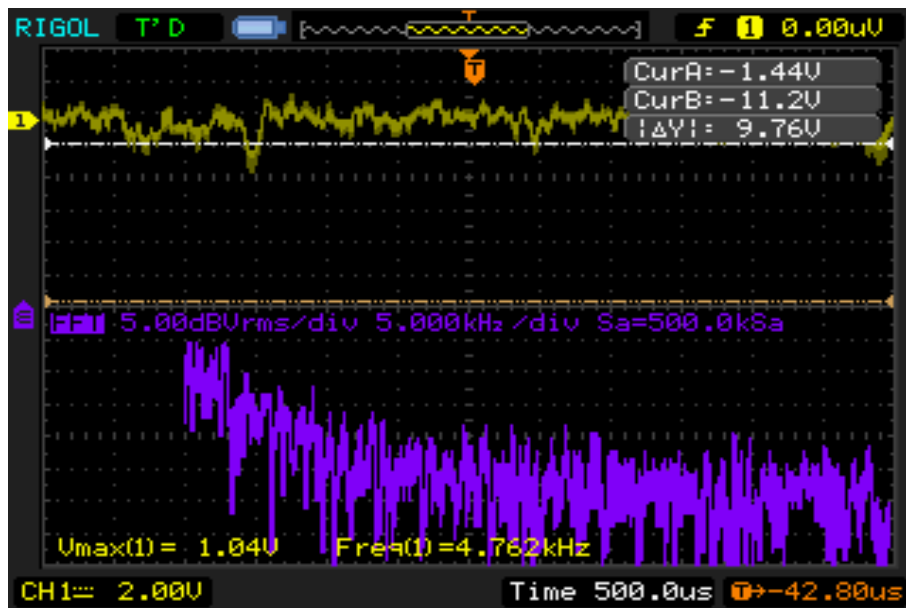


Figura 6.30. Ruido Rosa

4) Consumo

+15V:	9 mA
-15V:	1 mA

5) Calibración

El generador de ruido no precisa de ninguna calibración.

6.7 Mezclador de Señal

1) Simulación 3D

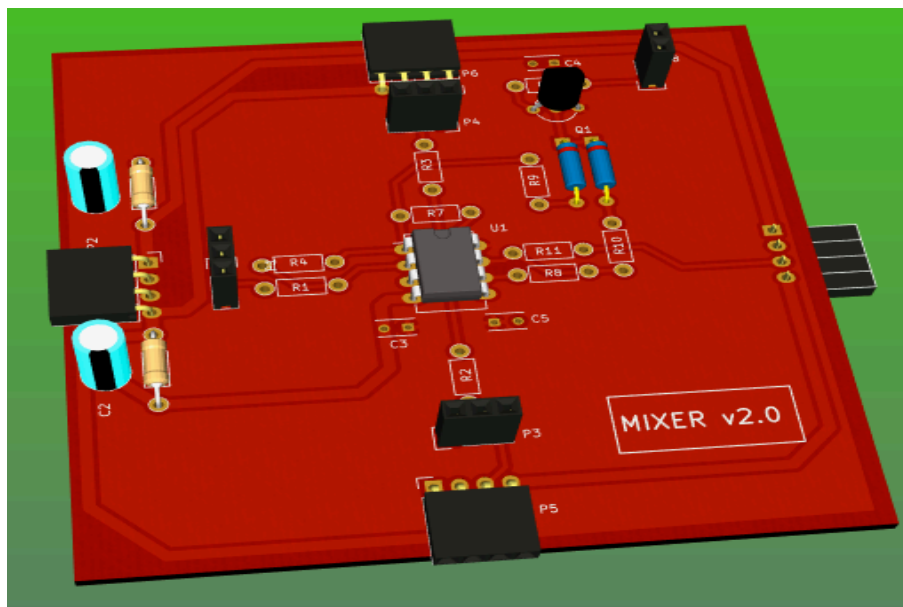


Figura 6.31. Simulación 3D Mezclador

2) PCB finalizada

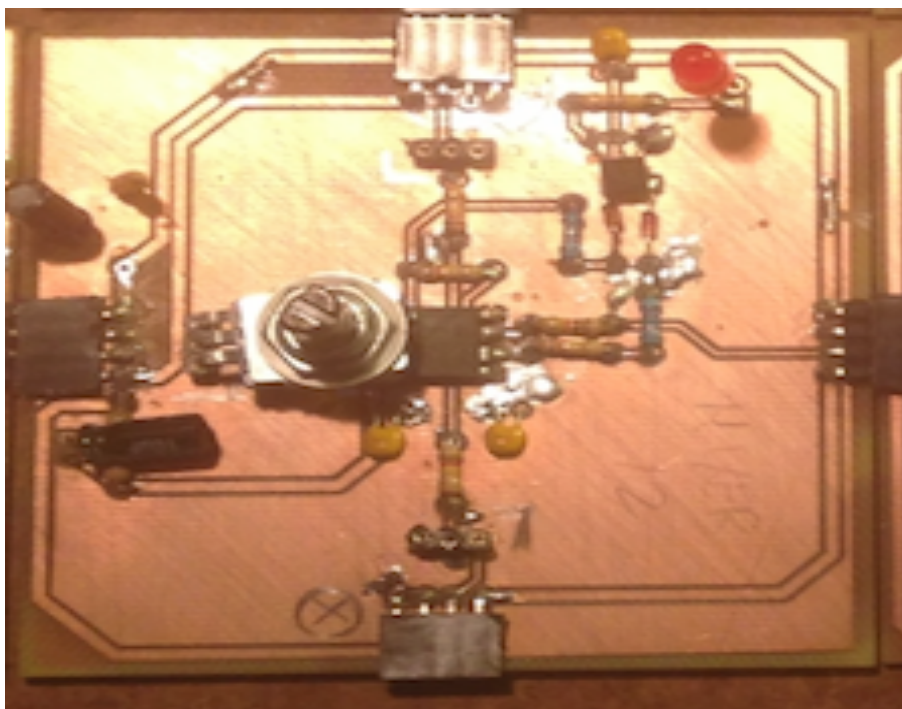


Figura 6.32. PCB Mezclador

3) Capturas osciloscopio

En la siguiente Figura se observa la suma de dos señales de entrada: una señal cuadrada y ruido blanco; se origina una señal resultante que combina ambos comportamientos de tensión.

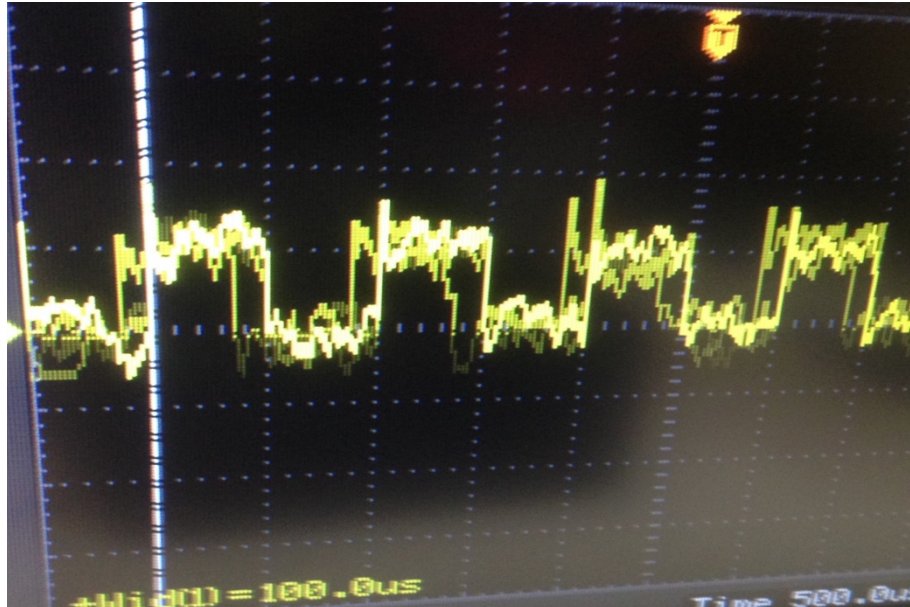


Figura 6.33. Suma de señales en el Mezclador

4) Consumo

+15V:	4 mA
-15V:	3 mA

5) Calibración

Este módulo no precisa de ninguna calibración para su correcto funcionamiento.

Capítulo 7.- Marco regulador, estudio socio-económico y presupuesto

7.1 Marco regulador

Este producto debe ceñirse a la regulación impuesta por los distintas comisiones que operan en Europa y Estados Unidos. Cada uno de los módulos debe presentar el etiquetaje correspondiente al cumplimiento de esta normativa, representado en la Figura 7.1:

- **Marcado CE.** Permite el libre transporte de productos que entren o se generen en el *mercado europeo*. Al incorporar el sello CE a su producto, el fabricante está declarando, bajo su responsabilidad, que el producto cumple todos los requerimientos legales que se necesitan para lograr el marcado CE.

En el caso del sintetizador diseñado las directivas a aplicar son:

1. La Directiva 2014/30/UE (EMC) de Compatibilidad Electromagnética. En referencia al producto diseñado, este no emite señales que puedan interferir remotamente con otros equipos eléctricos.
 2. La Directiva 2011/65/EU de la Restricción de uso de sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrodomésticos (ROHS).
 3. La Directiva 2006/95/EC referente al uso de productos de Bajo Voltaje. En este caso **no** se aplica ya que la tensión de trabajo del sistema no excede los 50 Voltios.
- **La marca FCC.** Establece que el producto cumple con la normativa para ser importado y comercializado en *Estados Unidos* sin interferir en los dispositivos

ni en la red de telecomunicaciones. El producto debe cumplir con el Apartado 15 del Título 47 del Código de Regulación Federal (CFR) que indica: “La operación está sujeta a las dos condiciones siguientes:

1. Este dispositivo no debe causar interferencias dañinas de ningún tipo
 2. Este dispositivo debe aceptar cualquier interferencia recibida, incluyendo interferencias que causen un mal comportamiento del sistema.”
- **Reciclaje de componentes y gestión de residuos generados.** Existe una obligación de marcado en todos los aparatos eléctricos o electrónicos según el Artículo 10 del RD 208/2005. El símbolo que indica que la recogida selectiva es el contenedor de basura tachado, diferenciándolo del resto de basuras urbanas.
 - **La patentabilidad de la idea.** Debe ser determinada por un organismo externo, que analice el diseño y lo compare con otras soluciones similares. Si la patente fuese validada llevará asociada unos costes de emisión, incrementales al número de países donde se aplique, y unos costes de mantenimiento anuales.



Figura 7.1. Marcado que aparecería en la etiqueta obligatoria del producto



Figura 7.2. Etapas en la comercialización de un producto

7.2 Estudio socioeconómico

Este documento se encuentra en la categoría de TFG Emprende y se ha desarrollado un modelo de negocio extenso sobre este proyecto. En el Anexo A2 se incorpora el Canvas de Innovación que complementa la información expuesta a continuación.

1) Plan de explotación del mismo

Tras el diseño del primer prototipo del nuevo sistema modular se pretende fundar una empresa basada en esta idea innovadora. El modelo de negocio se centrará en la venta de este sistema y en la difusión del producto a través de redes sociales. Las ventas del sistema se realizarán a través de un portal de venta online y en tiendas especializadas del sector, con proyección internacional. La página web contendrá manuales interactivos de uso y un foro activo para resolver dudas y problemas sobre los equipos.

2) Aplicaciones prácticas

El sistema puede ser empleado en solitario o complementando a otros instrumentos. Las intenciones del sistema son:

- **Transportabilidad.** Habilitar el desplazamiento de sintetizadores de manera cómoda y segura, ya sea por artistas sonoros, dj's o productores
- **Docencia.** Fomentar el aprendizaje de la síntesis al simplificar el conexionado y permitir una visualización más intuitiva
- **Organización.** Organizar un sistema modular complejo sacando las señales del modular mediante cables y distribuyéndolas de manera más clara gracias a los módulos diseñados

3) Definición de stakeholder

La innovación que busca y propone este sistema sólo ha sido comprobada por el autor, aunque la idea ha sido halagada y muy bien recibida entre profesionales del sector. Se pretende que el sistema otorgue una nueva visión de la síntesis y fomente el control físico del instrumento, sobre el control digital de instrumentos virtuales. Se cree que tendrá una buena aceptación entre clientes jóvenes, comprendidos entre 15-35 años, que comienzan a producir o a interesarse por la síntesis, por tanto, puede ser decisivo que las posibilidades de conexionado del sistema permitan que sea conectado con futuros instrumentos que vayan incorporando a su estudio. Se busca también el interés de un público más especializado que vean en esta herramienta una manera cómoda de transportar una gran cantidad de módulos para improvisar en cualquier lugar o de artistas con un gran sistema modular que desean mezclar varias señales sin tener que introducir la mano entre un amasijo de cables.

7.3 Presupuesto

En esta sección se recogen todos los costes asociados de la fabricación y el diseño del sintetizador modular:

- Se detallan los precios de los materiales, así como de las horas de trabajo y del coste del espacio, diferenciando entre el prototipado y la producción a mediana escala, ya que los costes acarreados de la fabricación de una unidad no son extrapolables a una producción mucho mayor.
- Los costes derivados del plan de marketing (“teaser” promocional, publicidad...) y el Coste de Adquisición del Cliente, se tratarán en etapas posteriores de la comercialización de dicho producto.
- Los costes asociados a la amortización de las máquinas utilizadas no se tendrán en cuenta, ya que el prototipado ha sido realizado en establecimientos de uso público, siendo nulo el coste de empleo de las herramientas. En el caso de una producción a gran escala, estos costes ya se tienen en cuenta en el precio que fija el fabricante por el lote de productos a realizar.

Los materiales genéricos tales como condensadores y resistencias se tratarán como si fuesen todos del mismo valor, siendo las pequeñas variaciones de precio despreciables. Los componentes más particulares de cada módulo se detallarán en nombre, cantidad utilizada, precio unitario y el total.

La cantidad de madera utilizada es la misma para cada una de las carcasas, lo único que se ve modificado es el grabado superficial, por tanto, se calculará el coste de fabricación de una de ellas y se multiplicará por el número de carcasas necesarias, en el caso de los prototipos, se precisan 8 unidades.

Para la elección de los embellecedores definitivos se ha recurrido a encargar lotes de diversos fabricantes y testar individualmente su comportamiento, para, posteriormente, elegir los que fuesen más acordes estéticamente. El coste asociado al encargo de estos lotes irá detallado en la sección de prototipado.

El análisis de los precios se basará en el catálogo de productos de la página web de venta de componentes electrónicos **Farnell**. Esta empresa, junto con **Mouser**, son la referencia a la hora de comprar cantidades individuales o lotes grandes, y trabajan con las principales fábricas de ensamblaje de Placas de circuito impreso. Nótese que la tecnología empleada en el diseño de las PCB ha sido en todo momento de Orificio pasante, facilitando su montaje y reparación, pero esta tecnología tiene un coste superior a la de Montaje Superficial o SMD. En caso de querer reducir aún más los costes, dicha tecnología podría ser remplazada.

Oscilador Controlado por Voltaje

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
78L15	1	0,59 €	0,59 €
79L15	1	0,54 €	0,54 €
OPA2137	1	2,27 €	2,27 €
BC547B	2	0,235 €	0,47 €
LM311N	1	0,90 €	0,90 €
TL074	1	0,68 €	0,68 €
1N4148 (diodo)	6	0,016 €	0,1 €
J111	1	0,261€	0,26 €
Termistor de 1K	1	0,74 €	0,74 €
Resistencias	51	0,068 €	3,46 €
Condensadores	13	0,31 €	4,02 €
Trimmer multivuelta	4	1,13 €	4,52 €
Potenciómetros	3	2,74 €	8,22 €
TOTAL			26,78 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
78L15	1	0,387 €	0,39 €
79L15	1	0,357 €	0,36 €
OPA2137	1	0,867 €	0,87 €
BC547B	2	0,083 €	0,17 €
LM311N	1	0,341 €	0,34 €
TL074	1	0,219 €	0,22 €
1N4148 (diodo)	6	0,0118 €	0,07 €
J111	1	0,087 €	0,09 €
Termistor de 1K	1	0,247 €	0,25 €
Resistencias	51	0,02 €	1,02 €
Condensadores	13	0,07 €	0,91 €
Trimmer multivuelta	4	0,376 €	1,51 €
Potenciómetros	3	1,08 €	3,24 €
TOTAL			9,44 €

Amplificador Controlado por Voltaje

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,845 €	0,85 €
TL071	1	0,63 €	0,63 €
BC547C	4	0,06 €	0,24 €
1N4148	1	0,016 €	0,02 €
Resistencias	24	0,068 €	1,63 €
Condensadores	5	0,31 €	1,55 €
Trimmer multivuelta	3	1,13 €	3,39 €
Potenciómetros	3	2,74 €	8,22 €
		TOTAL	16,53 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,273 €	0,27 €
TL071	1	0,191 €	0,19 €
BC547C	4	0,0368 €	0,15 €
1N4148	1	0,0118 €	0,01 €
Resistencias	24	0,02 €	0,48 €
Condensadores	5	0,07 €	0,35 €
Trimmer multivuelta	3	0,376 €	1,13 €
Potenciómetros	3	1,08 €	3,24 €
		TOTAL	5,82 €

Generador de Envolvente

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,68 €	0,68 €
7555	1	0,773 €	0,77 €
BC547C	3	0,06 €	0,18 €
1N4148	5	0,016 €	0,08 €
Resistencias	23	0,068 €	1,56 €
Condensadores	9	0,31 €	2,8 €
Diodo LED	1	0,08 €	0,08 €
Interruptor	2	1,53 €	3,06 €
Potenciómetros	4	2,74 €	8,22 €
TOTAL			17,74 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,219 €	0,22 €
7555	1	0,332 €	0,33 €
BC547C	3	0,0368 €	0,11 €
1N4148	5	0,0118 €	0,06 €
Resistencias	23	0,02 €	0,46 €
Condensadores	9	0,07 €	0,63 €
Diodo LED	1	0,06 €	0,06 €
Interruptor	2	1,11 €	2,22 €
Potenciómetros	4	1,08 €	4,32 €
TOTAL			8,41 €

Mezclador de Señal

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,845 €	0,85 €
BC547C	1	0,06 €	0,06 €
1N4148	2	0,016 €	0,03 €
Resistencias	13	0,068 €	0,88 €
Condensadores	5	0,31 €	1,55 €
Potenciómetros	3	2,74 €	8,22 €
TOTAL			11,59 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,273 €	0,27 €
BC547C	1	0,0368 €	0,04 €
1N4148	2	0,0118 €	0,02 €
Resistencias	13	0,02 €	0,26 €
Condensadores	5	0,07 €	0,35 €
Potenciómetros	3	1,08 €	3,24 €
TOTAL			4,18 €

Oscilador de Baja Frecuencia

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,68 €	0,68 €
7555	1	0,773 €	0,77 €
BC557B	1	0,246 €	0,246 €
Resistencias	31	0,068 €	2,11 €
Condensadores	9	0,31 €	2,8 €
Interruptor	1	1,53 €	1,53 €
Potenciómetros	2	2,74 €	5,48 €
TOTAL			13,62 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,219 €	0,22 €
7555	1	0,332 €	0,33 €
BC557B	1	0,08 €	0,08 €
Resistencias	31	0,02 €	0,62 €
Condensadores	9	0,07 €	0,63 €
Interruptor	1	1,11 €	1,11 €
Potenciómetros	2	1,08 €	2,16 €
TOTAL			5,15 €

Filtro Controlado por Voltaje

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,68 €	0,68 €
BC547C	2	0,06 €	0,12 €
1N4148	10	0,016 €	0,16 €
Resistencias	30	0,068 €	2,04 €
Condensadores	14	0,31 €	4,34 €
Trimmer multivuelta	2	1,13 €	2,26 €
Interruptor giratorio	1	3,71 €	3,71 €
Potenciómetros	4	2,74 €	10,96 €
TOTAL			24,27 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,219 €	0,22 €
BC547C	2	0,0368 €	0,07 €
1N4148	10	0,0118 €	0,12 €
Resistencias	30	0,02 €	0,60 €
Condensadores	14	0,07 €	0,98 €
Trimmer multivuelta	2	0,376 €	0,752 €
Interruptor	1	2,57 €	2,57 €
Potenciómetros	4	1,08 €	4,32 €
TOTAL			9,63 €

Generador de Ruido

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,68 €	0,68 €
BC547C	3	0,06 €	0,18 €
Resistencias	23	0,068 €	1,56 €
Condensadores	13	0,31 €	4,03 €
		TOTAL	6,45 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL074	1	0,219 €	0,22 €
BC547C	3	0,0368 €	0,11 €
Resistencias	23	0,02 €	0,46 €
Condensadores	13	0,07 €	0,91 €
		TOTAL	1,7 €

Módulo de Salida

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,845 €	0,85 €
2N3904	1	0,167 €	0,17 €
Diodo LED	1	0,084 €	0,08 €
Resistencias	6	0,068 €	0,41€
Condensadores	2	0,31 €	0,62 €
Jack de audio	1	1 €	1 €
Potenciómetro	1	2,74 €	2,74 €
TOTAL			5,87 €

El tamaño del lote elegido es de 1000 unidades:

Nombre del componente	Cantidad	Precio unit.	Precio tot.
TL072	1	0,273 €	0,27 €
2N3904	1	0,0373 €	0,04 €
Diodo LED	1	0,0617 €	0,06 €
Resistencias	6	0,02 €	0,12 €
Condensadores	2	0,07 €	0,14 €
Jack de audio	1	0,643 €	0,64 €
Potenciómetro	1	1,08 €	1,08 €
TOTAL			2,35 €

Coste de ideación y prototipado:

Electrónica:

Research, búsqueda de información, compras: 80 horas

Curso Diseño de PCB: 7,5 horas

Diseño de placas: 75 horas

Testeo de placas y ensamblado: 110 horas

Carcasa:

Fabricación: 100 €

Acabados estéticos: 50 €

Coste de mano de obra

Ingeniero: 16680 €

Subcontratación de diseñador de producto: 5500 €

Equipos necesarios

Software empleado: el trabajo ha sido realizado al 100% con la ayuda de software libre

Ordenador: 1000€

Máquina de corte láser: 7500€

Impresora 3D: 500 €

Instrumentación electrónica: 640 €

Costes indirectos (espacio de trabajo, luz, agua, teléfono, etc)

Alquiler de estudio 1 año: 2350 €

Coste medio total de la fabricación de un módulo

Componentes: 5,83€

PCB: 0,35 €

Carcasa: 8€

TOTAL: 14,20 €

Precio de venta al público

Se busca un precio de venta al público de menos de 100 € por módulo, equiparándolo a los precios del sector.

P.V.P: 83 € €

I.V.A (21 %) : 17,43 €

Resumen costes

El coste total de desarrollo de este proyecto en el plazo de un año asciende a:

Mano de obra y equipos	31820 €
Costes indirectos	2350 €
Prototipo	450 €
TOTAL	34620 €

Capítulo 8.- Conclusiones y futuras líneas de trabajo

8.1 Conclusiones

Este documento presenta las siguientes finalidades:

- Documentar la tecnología de la síntesis y su estado de la técnica
- Rediseñar módulos analógicos clásicos, modificando su conectividad, sin perder la calidad sonora, fundamentándose en el uso de componentes básicos y diseños sencillos de comprender.
- Plantear la creación de una empresa con un modelo de negocio basado en la innovación

Los objetivos planteados en el Capítulo 1 se han cumplido, obteniendo un sistema final sencillo, intuitivo y con un precio de venta competitivo.

El proceso no ha sido sencillo. Se ha tenido que recurrir a formación académica adicional, lo que ha supuesto retrasar ligeramente los plazos previstos inicialmente, debido a:

- Estudiar, interpretar y simular los distintos esquemáticos.
- Proponer un nuevo sistema de conexionado
- Diseñar las placas de circuito impreso, soldarlas y testearlas
- Emplear la tecnología de impresión 3D para el prototipado de las carcasas.

Desde el inicio, el proyecto ha buscado el minimalismo, aplicando dicha filosofía en :el uso de componentes genéricos, el diseño presentado, la funcionalidad innovadora, el ensamblado de la carcasa y el conexionado del sistema completo.

8.2 Trabajos futuros

Muchos diseños de otros módulos con funcionalidades distintas no se han podido realizar hasta el momento, como por ejemplo:

- **Generador de envolvente compleja.** Se ha diseñado un generador de envolvente de dos etapas, con control por voltaje independiente para cada una de las etapas.
- **Operador matemático analógico.** Módulo que incluye dos entradas (A y B) y que devuelve en sus salidas el valor Mínimo y Máximo de la comparación de ambas señales.
- **Filtro *Ladder*.** El diseño de este módulo se fundamenta en el uso de pares de transistores en disposición de “escalera” de hay su denominación de *Ladder* (escalera en inglés). Este diseño se encuentra en el característico filtro paso-bajo del MiniMoog (Figura 8.1) y el uso del amplificador de transductancia LM13700 como mecanismo de control de voltaje [T. Instruments 2]. Ambos proporcionan un nuevo mecanismo de control del sonido y se podrán aplicar en futuras líneas de trabajo.

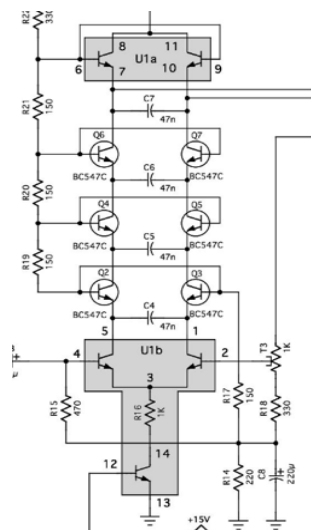


Figura 8.1. Filtro del Minimoog

- **Módulo de waveshaping.** Es posible obtener nuevas formas de onda disponibles en los módulos osciladores como el LFO o el VCO, mediante el uso de circuitos rectificadores que deformen la onda introducida.
- **Efectos.** Este tipo de módulos produciría un efecto en el sonido, sin afectar inicialmente a su timbre, tales como reverberación y eco.
- **Tecnología digital.** Adecuar la tecnología analógica de estos módulos a la necesidad digital del mercado otorgaría nuevas posibilidades, como por ejemplo,

la inclusión de conexionado MIDI, que permitiría la comunicación con ordenadores y con secuenciadores externos.

El diseño exterior de los módulos puede seguir siendo mejorado incluyendo funcionalidades estéticas y de uso:

- **Indicadores luminosos.** Muchos de los diodos LED de referencia han sido omitidos en este primer prototipo ya que primaba el diseño sonoro. La inclusión de iluminación en cada uno de los módulos permitirá al artista una mayor facilidad de comprensión del estado de cada módulo y resaltarán visualmente al módulo, dotándolo de indicativos luminosos (Figura 8.2). El circuito integrado LM3914N [T. Instruments 3] es capaz de gobernar hasta 10 diodos LED, siendo aplicado en multitud de circuitos de audio como vúmetro (medidor de volumen). En algún módulo adicional se plantea la incorporación de pantallas TFT de 0,96" que pueden ser utilizadas como osciloscopio o como navegación de menús.



Figura 8.2. Referencia visual en un potenciómetro

- **Conectores Jack.** El sistema podrá ser enlazado a sintetizadores analógicos externos o señales de control de un sistema modular. A su vez, permite la posibilidad de modulaciones más complejas que no puedan realizarse lateralmente.
- **Conexionado lateral.** Actualmente se realiza mediante pines macho-hembra aunque desde el inicio se deseaba incluir tecnología magnética, similar a la empleada en el cable de carga del ordenador MacBook de Apple (Figura 8.3). Estos conectores no existen de manera comercial y deben ser diseñados de manera exclusiva para cada aplicación. Al no ser la finalidad de este trabajo se prescindió de esta idea, aunque en un futuro proyecto comercial se tendrá en cuenta.



Figura 8.3. Magsafe de Apple

- **Prevención de errores.** Se habilitará un sencillo conector deslizante y retráctil que muestre o esconda a voluntad el conexionado lateral, de tal manera que ningún módulo quede comunicado en ninguna de sus caras sin que el usuario desee dicha interacción. Del mismo modo también se evita que la alimentación se conecte de manera incorrecta.

Como consecuencia de este trabajo se ha iniciado un nuevo Trabajo de Fin de Grado por parte de un alumno de la Universidad Carlos III desarrollando nuevos módulos que se integrarán con los ya implementados.

REFERENCIAS

- [**Arturia 14**] Arturia, Catálogo de productos; 2014
- [**Brice, J**] J.L. Brice; Voltage-controlled Ramp Generator; Wireless World, Junio, 1976
- [**Casabona, H**] Helen Casabona, David Frederick; Beginning Synthesizer; Alfred Music, 1987
- [**Cateforis, T**] Theo Cateforis; The Rock History Reader; Routledge, 2013
- [**Dimopoulos, H**] Hercules G. Dimopoulos; Analog Electronic Filters: Theory, Design and Synthesis; Springer Science & Business Media, 2011
- [**Doepfer 15**] Doepfer, Catálogo de productos; 2017
- [**Ellis, M**] Michael Glynn Ellis; Electronic Filter Analysis and Synthesis; Artech House, 1994
- [**Engineering, A**] Audio Engineering Society, Digital Waveshaping Synthesis; 1976
- [**Fairchild 1**] Fairchild, BC54X NPN Epitaxial Silicon Transistor; 2014
- [**Friedman, D**] Dean Friedman; Synthesizer Basics; Amsco Publications, 1986
- [**Galvin, T**] Timothy Joseph Galvin; A Study of the Transistor Schmitt Trigger circuit; University of Wisconsin-Madison, 1959
- [**Holmes, T**] Thom Holmes; Electronic and experimental music: Technology, music and culture; Routledge, 2015
- [**Horn, D**] Delton T. Horn; Digital Electronic Music Synthesizers; Tab Books, 1988
- [**Hund, A**] August Hund; Frequency Modulation; McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1942
- [**Intersil 1**] Intersil; ICM7555, ICM 7556, General Purpose Timers; Datasheet, 2016
- [**Jacky, J**] Jonathan Jacky; Two chip generator shapes synthesizer's sounds; Electronics Magazine Septiembre 11, 1980
- [**Jenkins, M**] Mark Jenkins; Analog Synthesizers: Understanding, Performing, Buying; CRC Press, 2009
- [**Kennedy, E**] Elredge Johnson Kennedy; Holt, Rinehart and Winston, Operational Amplifier Circuits: Theory and Application; 1988

- [Kirschman, R]** Randall K. Kirschman; Adjustable e^x generator colors synthesizer sounds; Electronics Magazine Julio 17, 1980
- [Liu, S]** Shih-Chii Liu; Analog VLSI: Circuits and Principles; MIT Press, 2002
- [Marston, R]** R.M. Marston; Diode, Transistor & FET Ciruits Manual: Newnes Circuits Manual Series; Elsevier, 2013
- [McGuire, S]** Sam McGuire, Nathan Van der Rest; The Musical Art of Synthesis, CRC Press, 2015
- [Miranda, E]** Eduardo Miranda; Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming; CRC Press, 2012
- [Mitchell, D]** Daniel Mitchell; Basicsynth; Lulu.com, 2009
- [Noever, P]** Peter Noever; Granular Synthesis; Cantz, 1998
- [Pelgrom, M]** Marcel J. M. Pelgrom; Analog-to-Digital Conversion; Springer Science & Business Media, 2012.
- [Pinch T]** T. J. Pinch, Franck Trocco; Analog Days: The invention and impact of the Moog synthesizer; Harvard University Press, 2009
- [Puckette, M]** Miller Puckette; The Theory and Technique of Electronic Music; World Scientific, 2007
- [Pro, Q]** Pro-Quest, The Effects of computer-assited Keyboard technology and MIDI accompaniments; 2007
- [Rincón, J]** Julio d'Escrivan Rincón; Music Technology; Cambridge University Press, 2012
- [Rutkowski, G]** George B. Rutkowski; Operational Amplifiers: Integrated and Hybrid Circuits; John Wiley & Sons, 1993
- [Schulz, D]** Donald Frank Schulz; The transistor differential amplifier; University of Wisconsin-Madison, 1956
- [Self, D]** Douglas Self; Audio Engineering Explained; CRC Press, 2012
- [Serum, M]** X-Fer Records, Serum, Manual for a Synthesizer Instrument plug-in; 2014
- [Shepard, B]** Brian K. Shepard; Refining Sound: A Practical Guide to Synthesis and Synthesizers; OUP USA, 2013

[Stanford] Department of Electrical Engineering, Transistor Noise Performance; Stanford University, 1960

[Steiner, N] Nyle A. Steiner; Voltage-tunable active filter features low, high and bandpass modes; Electronic Design 25, Diciembre 6, 1974

[T. Instruments 1] Texas Instruments, TL08xx J-FET- Input Operational Amplifiers; Febrero 1977, revisado en Mayo 2015

[T. Instruments 2] Texas Instruments, LM13700 Dual Operational Transductance Amplifiers with Linearizing Diodes and Buffers; Noviembre 1999, revisado en Noviembre 2015

[T. Instruments 3] Texas Instruments, LM3914 Dot/Bar Display Driver; Texas Instruments, Enero 2000, revisado en Marzo 2013

[T. Instruments 4] Texas Instruments, LM555 Timer; Texas Instruments, Febrero 2000, revisado en Enero 2015

[Usson, Y] Yves Usson; Synthesizer Esquematics, *yusynth.com*, consultada en marzo de 2016

[Vail, M] Mark Vail; The Synthesizer: A Comprehensive Guide to understanding, programming, playing and recording the ultimate electronic music instrument; OUP USA, 2014.

[Wang, L] Laung-Terng Wang, Yao-Wen Chang, Kwang-Ting Cheng; Morgan Kaufmann, Electronic Design Automation: Synthesis, Verification and Test; 2009

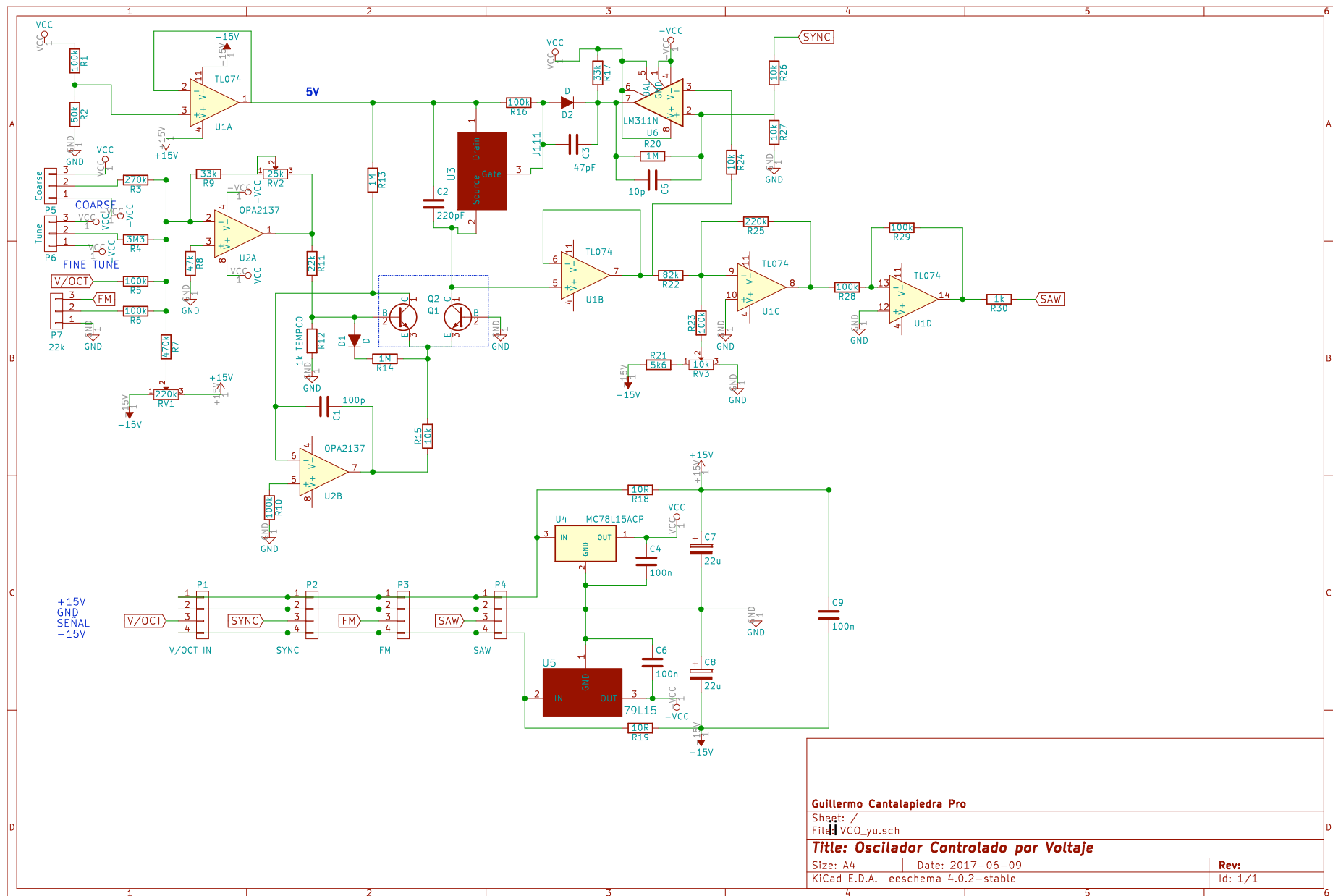
[Williston, J] Jay Williston; Thaddeus Cahill Teleharmonium; Synthmuseum.com

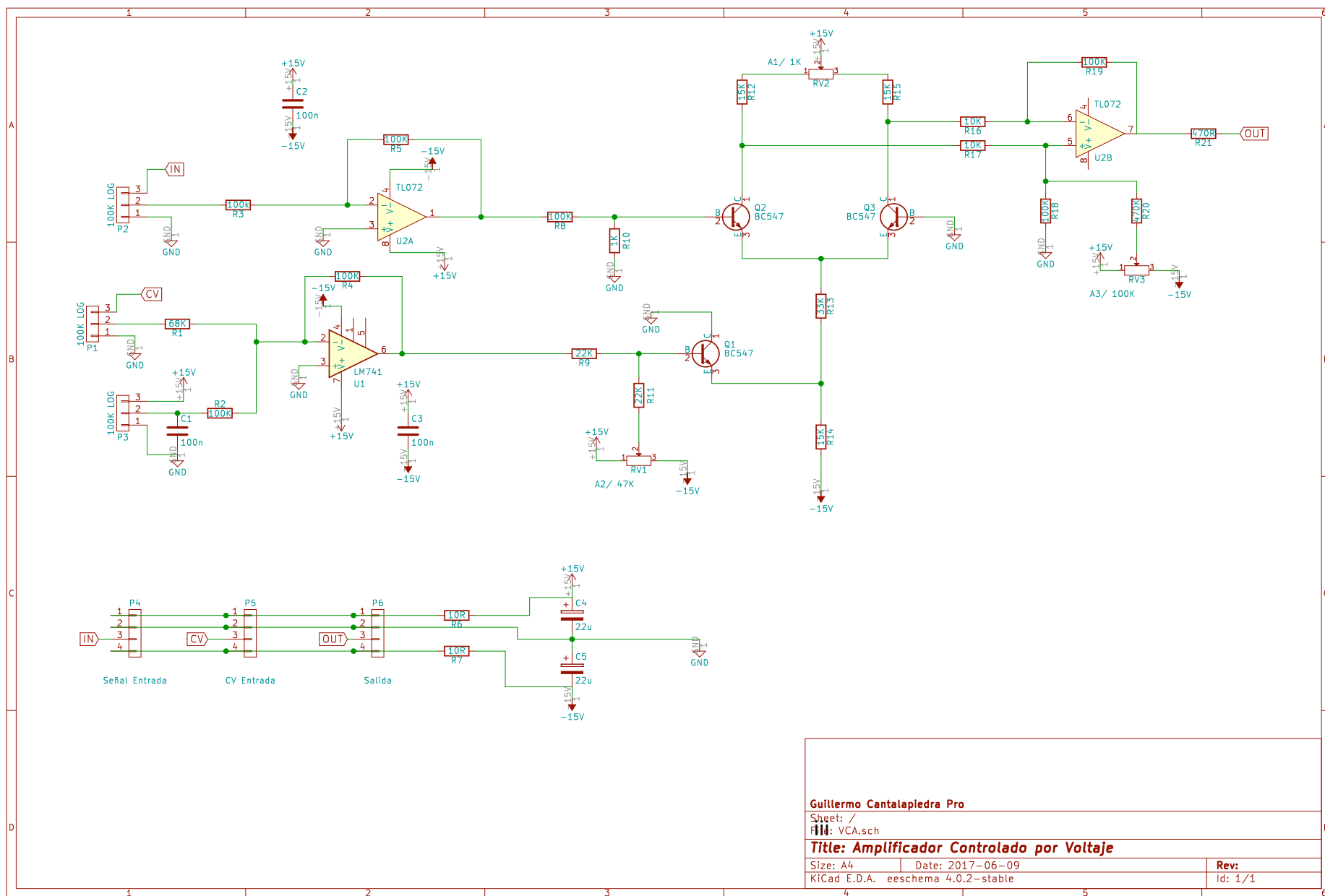
[Wilson, R] Ray Wilson; Make: Analog Synthesizers: a modern approach to old-school sound synthesis; Maker-Media, 2013

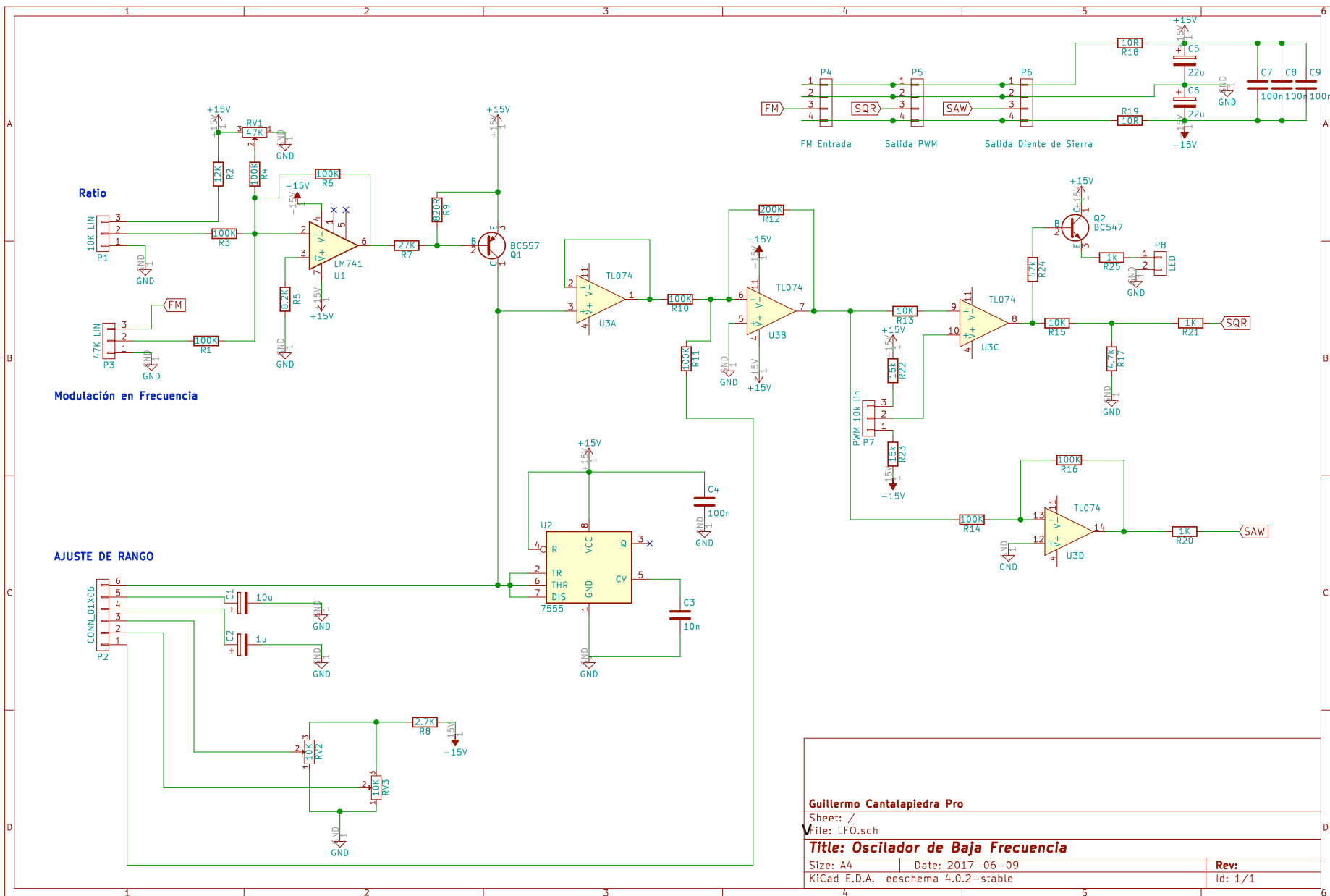
ANEXOS

A1 ESQUEMÁTICOS

A continuación se muestran los esquemas electrónicos de los que se componen los 8 módulos diseñados.







Guillermo Cantalapiedra Pro

Sheet: /

File: LFO.sch

Title: Oscilador de Baja Frecuencia

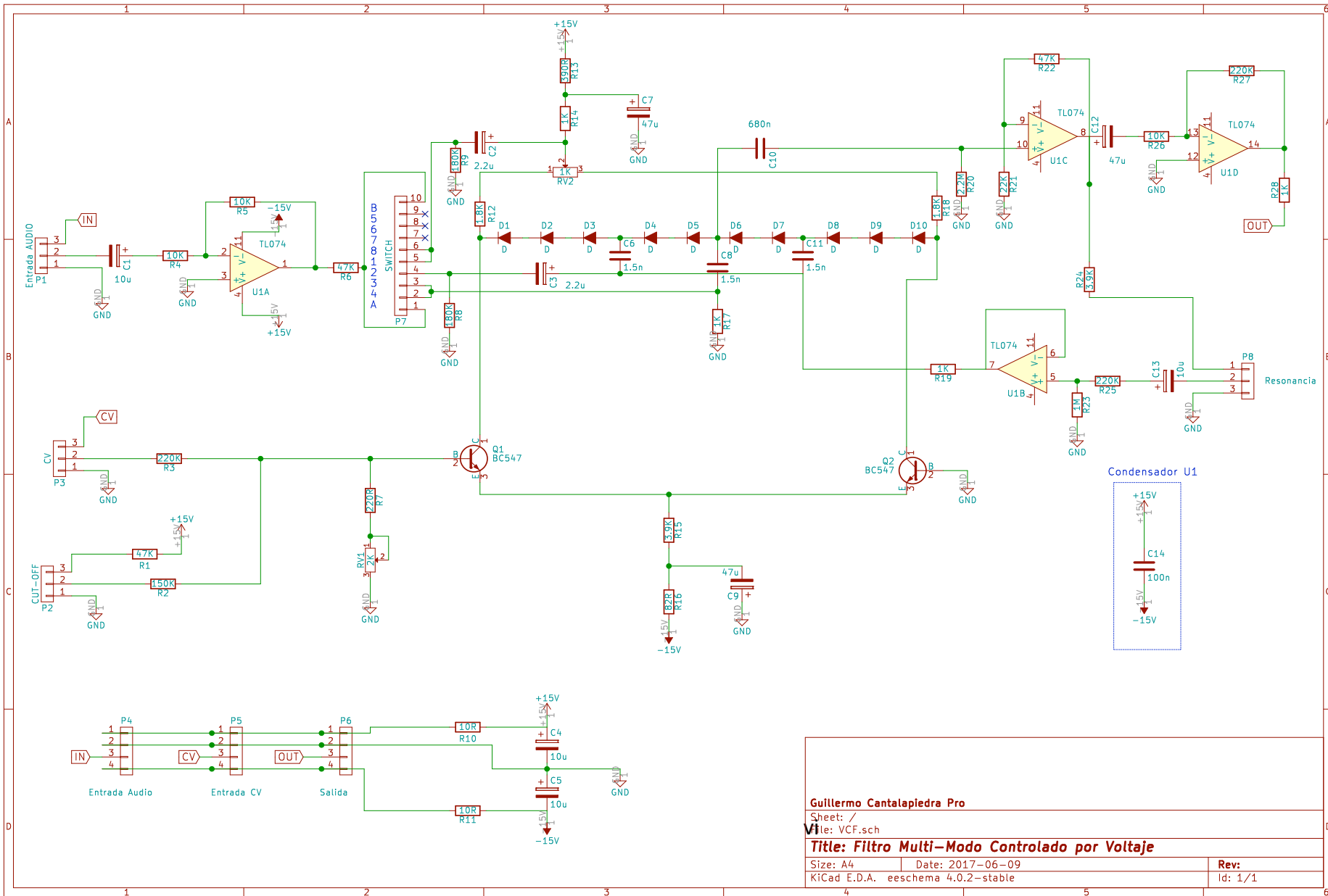
Size: A4

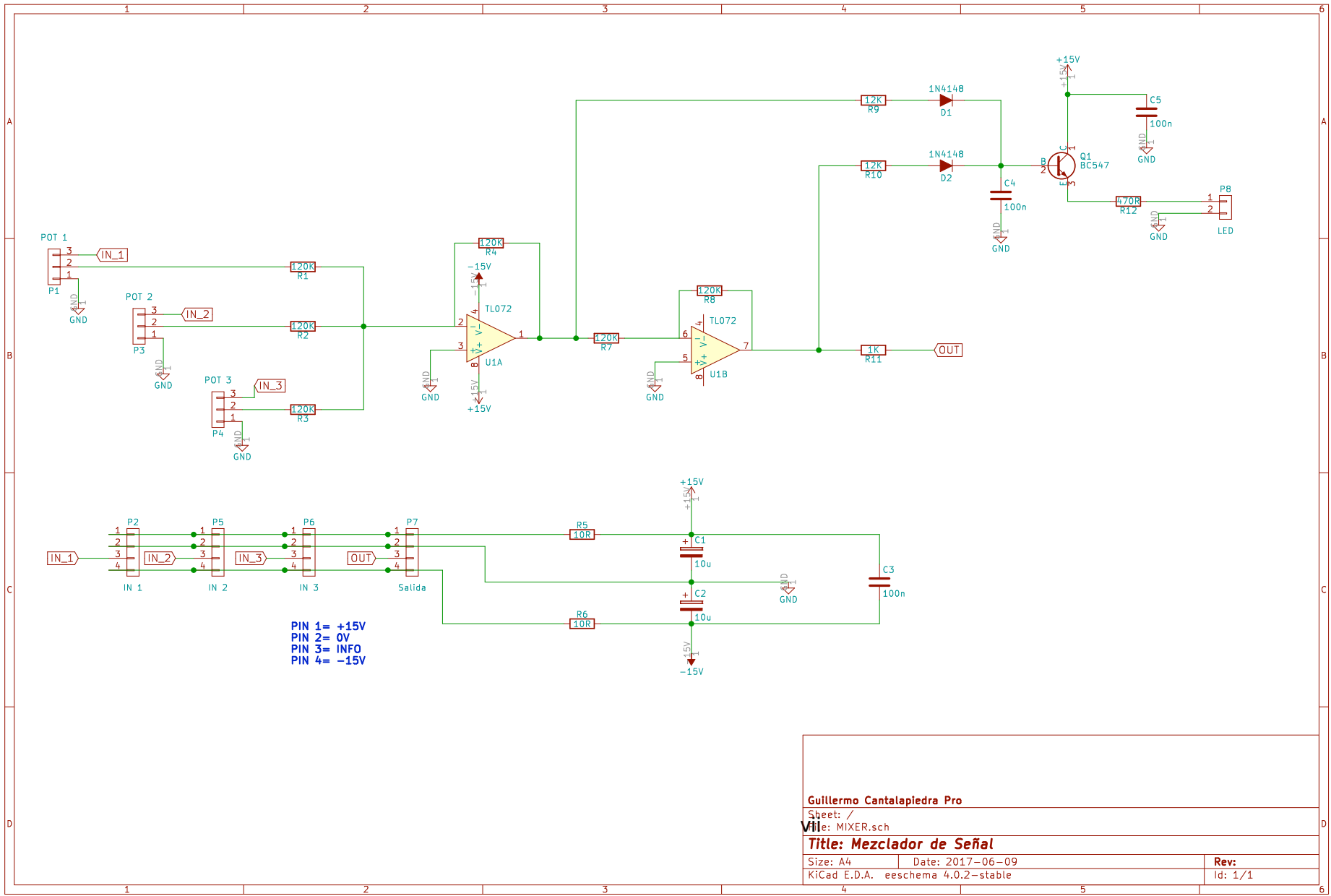
Date: 2017-06-09

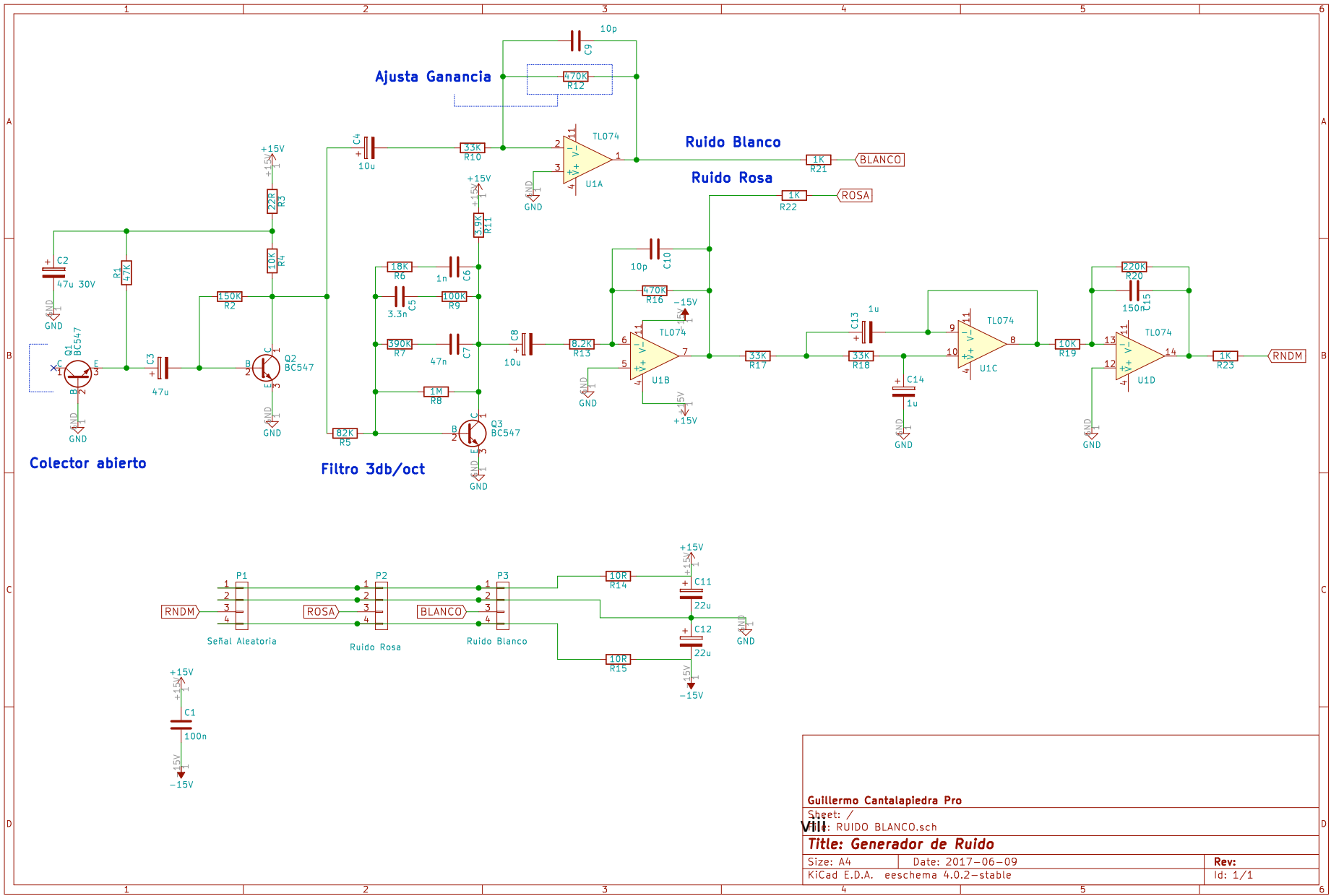
Rev:

KiCad E.D.A. eeschema 4.0.2-stable

Id: 1/1







Guillermo Cantalapiedra Pro

Sheet: /

VIII: RUIDO BLANCO.sch

Title: Generador de Ruido

Size: A4

Date: 2017-06-09

Rev:

KiCad E.D.A. eeschema 4.0.2-stable

Id: 1/1

x

A2 CANVAS DE INNOVACIÓN

Este Anexo incorpora la información relativa al modelo de negocio basado en la innovación organizada en un Modelo Canvas y se complementa con los datos que se exponen en el **Capítulo 7 Apartado 7.2** referente al Estudio socioeconómico.

El Canvas de innovación se organiza de la siguiente manera:



